

**MODELO ESTIMADO PARA EL RUIDO GENERADO POR LA INTERACCIÓN
LLANTA-PAVIMENTO EN CORREDORES VIALES DE PAVIMENTO RIGIDO
Y FLEXIBLE DE BOGOTÁ D.C**

JHON WILSON CORREA AVELLO

**UNIVERSIDAD SERGIO ARBOLEDA
ESCUELA DE POSGRADOS
MAESTRIA EN DOCENCIA E INVESTIGACION UNIVERSITARIA
BOGOTA D.C., MAYO DE 2013**

**MODELO ESTIMADO PARA EL RUIDO GENERADO POR LA INTERACCIÓN
LLANTA-PAVIMENTO EN CORREDORES VIALES DE PAVIMENTO RIGIDO
Y FLEXIBLE DE BOGOTÁ D.C**

**Trabajo de grado para optar al título de magister en docencia e
investigación universitaria**

JHON WILSON CORREA AVELLO

Director

Ingeniero, Magister Hernando Camacho Camacho

**UNIVERSIDAD SERGIO ARBOLEDA
ESCUELA DE POSGRADOS
MAESTRIA EN DOCENCIA E INVESTIGACION UNIVERSITARIA
BOGOTA D.C., MAYO DE 2013**

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	10
ABSTRACT	12
1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	14
1.1. PLANTEAMIENTO DE LA PREGUNTA O PROBLEMA, HIPÓTESIS Y SU JUSTIFICACION	14
1.1.1. Pregunta de investigación	14
1.1.2. Justificación	14
1.1.3. Hipótesis	15
1.2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO	16
1.2.1. Conceptos básicos sobre ruido	16
1.2.2. ¿Por qué se produce el ruido en la interfaz entre la llanta y el pavimento?	18
1.2.3. Técnicas de medición de ruido en carreteras	23
1.2.4. Estado del conocimiento	29
1.3. OBJETIVOS	49
1.4. METODOLOGÍA PROPUESTA	49
1.5. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	51
1.6. RESULTADOS/PRODUCTOS ESPERADOS Y POTENCIALES BENEFICIARIOS	52
1.6.1. Relacionados con la generación de conocimiento y/o nuevos desarrollos tecnológicos	52
1.6.2. Conducentes al fortalecimiento de la capacidad científica institucional y nacional	53
1.6.3. Dirigidos a la apropiación social del conocimiento	54
1.7. IMPACTOS ESPERADOS A PARTIR DEL USO DE LOS RESULTADOS	54
1.8 DECLARACIONES SOBRE EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	56
1.8.1. Impacto ambiental	56

1.8.2. Pertinencia social	56
1.8.3. Aporte a la educación	56
2. PRESUPUESTO	58
3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	60
3.1. SUPERFICIE DE RODAMIENTO	61
3.2. NIVELES DE TRÁFICO, TIPOS DE VEHÍCULOS Y VELOCIDAD DE OPERACIÓN DE LOS VEHÍCULOS	65
3.3. TIPOLOGÍA DE LLANTAS DE LOS VEHÍCULOS	70
3.4. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO PARA MEDICIÓN Y AJUSTE DE CONDICIONES PREVALECIENTES EN LOS SECTORES VIALES	71
3.5. ADQUISICIÓN DE DATOS DE CAMPO	73
3.5.1. Software de prueba	73
3.5.2. Estadística de la medición	74
3.5.3. Estandarización de niveles puros a niveles audibles	75
3.5.4. Mediciones en campo	75
4. CONCLUSIONES	78
5. RECOMENDACIONES	81
REFERENCIAS	82

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Niveles de ruido asociados con actividades comunes.	17
Fuente: Arizona DOT	
Tabla 2. Mecanismos de generación y amplificación del ruido debido a la interacción llanta/pavimento. Tomado y modificado de Rasmussen, 2007	20
Tabla 3. Ejemplos de granulometrías OGFC. (Smith, 2000)	34
Tabla 4. Resultados de pruebas de niveles de ruido en el Estado de Arizona. (Adaptado de WDOT, 2005)	36
Tabla 5. Cronograma de actividades para la investigación	52
Tabla 6. Generación de nuevo conocimiento de la investigación	53
Tabla 7. Fortalecimiento de la comunidad científica por la investigación	53
Tabla 8. Apropiación social del conocimiento de la investigación	54
Tabla 9. Impactos esperados de la investigación	55
Tabla 10. Presupuesto global de la propuesta por fuentes de financiación (en miles de \$)	58
Tabla 11. Descripción de los gastos de personal (en miles de \$)	58
Tabla 12. Descripción de los equipos que se planea adquirir (en miles de \$)	59
Tabla 13. Descripción y cuantificación de los equipos de uso propio (en miles de \$)	59
Tabla 14. Descripción y justificación de los viajes (en miles de \$)	59
Tabla 15. Descripción y justificación de los viajes (en miles de \$)	59
Tabla 16. Materiales y suministros (en miles de \$)	59
Tabla 17. Características del perfil longitudinal	64
Tabla 18. Composición total de flujo vehicular para el día de comportamiento máximo en la calle 26	67
Tabla 19. Composición total de flujo vehicular para el día de comportamiento máximo en la calle 80	68
Tabla 20. Análisis de acuerdo al ensayo frecuencia vs velocidad de	77

operación (Hz vs Km/h)

Tabla 21. Resumen estadístico intensidad (dB) vs velocidad de operación (Km/h) 77

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Efecto al adicionar fuentes de ruido. (Adaptado de WDOT 2005)	17
Figura 2. Efecto de la distancia en el ruido generado. (Adaptado de WDOT 2005)	17
Figura 3. Efectos de la velocidad sobre el ruido vehicular y la velocidad de cruce. fuente: Rasmussen, 2007	19
Figura 4. Procedimiento estadístico de paso para medición de niveles de ruido	24
Figura 5. Procedimiento de Proximidad – CPX para medición de niveles de ruido	25
Figura 6. Muros de ruido en autopistas interestatales (Noise Walls). Fuente: Rubber Pavement Association	30
Figura 7. Textura de arrastre artificial. (Drag Textures)	31
Figura 8. Pavimento rígido con textura realizada con discos diamantados	33
Figura 9. Apariencia de mezcla con gradación abierta OGFC a izquierda vs mezcla densa a derecha	35
Figura 10. Carril externo en sobrecarpeta con mezcla OGFC vs carriles centrales en mezcla densa convencional	36
Figura 11. Sistema de medición bajo norma ISO 11819-2 en Suecia. Fuente: Höjer, 2008	38
Figura 12. Patrones de labrado de la llanta de acuerdo con la norma ISO 11819-2. fuente: Van Leewen, 2011	39
Figura 13. Sistema de posicionamiento de los micrófonos. Fuente: Van Leewen, 2011	40
Figura 14. Sistema de cilindro rotatorio para medir el ruido generado por la interacción entre la llanta y el pavimento. Fuente: Bernhard, 2011	43

Figura 15. Coeficiente de absorción acústica como una función de la fracción volumétrica de cenoesferas (a) para una muestra de un cemento enriquecido de 255m de longitud y (b) para una muestra de asfalto de 64mm de espesor. Fuente: Tiwari, 2004	45
Figura 16. Comparación de los espectros de absorción acústica calculados y medidos para $r=5.25\text{mm}$, $d=1.01\text{mm}$, $\kappa=1.1$, $m=1.00$. Fuente: Kim, 2010	47
Figura 17. Equipo prototipo para medición de ruido de la interacción llanta-pavimento. Fuente: VAN LEEWEN, 2011	51
Figura 18. Apariencia de pavimento flexible seleccionado en Calle 80	60
Figura 19. Apariencia de pavimento rígido seleccionado en Calle 26	61
Figura 20. Parámetros para calificar resultados del ensayo circulo de arena	62
Figura 21. Comparación de dos tramos de acuerdo con los datos obtenidos en el ensayo circulo de arena	62
Figura 22. Parámetros para calificar resultados del ensayo IRI (Índice de Rugosidad Internacional)	63
Figura 23. Comparación de dos tramos de acuerdo con los datos obtenidos en el ensayo IRI	64
Figura 24. Comparación de los dos tramos de acuerdo con los datos obtenidos en el ensayo de profundidad media de perfil	65
Figura 25. Resultados Calle 26 condición de flujo vehicular máximo	66
Figura 26. Resultados Calle 26 composición flujo vehicular máximo	66
Figura 27. Resultados Calle 80 condición de flujo vehicular máximo	67
Figura 28. Resultados Calle 80 composición flujo vehicular máximo	68
Figura 29. Resultados de medición de la velocidad para los tramos seleccionados (calle 26 y calle 80)	69
Figura 30. Resultados Tipología de llantas Calle 26	70
Figura 31. Resultados Tipología de llantas Calle 80	70
Figura 32. Idealización del equipo	71
Figuras 33 y 34. Equipo Construido	71

Figuras 35 y 36. Equipo Construido	72
Figuras 37 y 38. Realización de mediciones	72
Figura 39. Realización de mediciones	72
Figura 40. Tiempo(s) vs intensidad (dB)	73
Figura 41. Nivel de salida (La intensidad de salida de la corriente se mide en dB (RMS), que son los decibeles reales del sonido y la intensidad de salida de la corriente se mide en dB (SPL), que son los decibeles medidos en presión sonora	73
Figura 42. Escala logarítmica de frecuencia (Hz) vs intensidad (dB)	74
Figura 43. Espectrograma de intensidad (dB) vs frecuencia (Hz)	74
Figura 44. Estadísticas de la medición	74
Figura 45. Curvas isofónicas	75
Figura 46. Resultados de medición Calle 26	76
Figura 47. Resultados de medición Calle 80	76

RESUMEN

El ruido ambiental es generado por diferentes fuentes y por distintos actores, dentro de los que se pueden caracterizar: la zona ó uso de suelo, tipo de vehículos y niveles de tráfico y amplitud de un determinado entorno en cuanto a barreras para la propagación o disipación del ruido. Estudios realizados en Bogotá y en Colombia, sólo han evaluado los niveles de ruido ambiental (Pacheco et al., 2009, López et al., 2008, Gavinowich et al., 2006). El ruido producido por el tráfico vehicular en una carretera es generado por tres fuentes principales: el punto de contacto entre la llanta y la carretera, el motor del vehículo y el ducto de evacuación de gases (exhosto) del mismo. El fenómeno del ruido generado entre la interacción llanta-pavimento se encuentra aún en estudio en la mayor parte de los países del mundo. El estado del arte reporta que se han realizado importantes contribuciones para el entendimiento del fenómeno y para avanzar en la mitigación del ruido que se genera. Sin embargo, en el contexto latinoamericano no se le ha dado la importancia que merece, y Colombia no ha sido la excepción.

Con los resultados de la presente investigación, dirigida por el autor en cuatro fases investigativas desarrolladas con el apoyo de estudiantes de los programas de ingeniería civil e ingeniería mecatrónica de la universidad Piloto de Colombia entre los años 2010 y 2013, se desea dar un aporte al primer estudio en el país para la comprensión del fenómeno de la contaminación sonora por efecto de la interacción llanta-pavimento, se consolidan y unifican los resultados tendientes a la obtención de parámetros medibles y se propone un modelo de trabajo para estimar el ruido generado por la interacción llanta-pavimento, partiendo del análisis de las principales variables que componen el fenómeno y comprendiéndolo. Como parte de los impactos de los resultados se espera que la comunidad articule los resultados a proyectos de investigación relacionados con infraestructura sostenible que se desarrollan en el país (por

ejemplo el Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá IDU) para potenciar la propuesta de medidas encaminadas a la mitigación de ésta clase de contaminación enfrentando el problema de manera directa desde la fuente. Además de la posible formulación de una política distrital y/o nacional encaminada a la sustentabilidad en las infraestructuras de transporte y calidad de vida.

Palabras Clave: Ruido, Interacción, Pavimentos, Llanta-pavimento

ABSTRACT

Environmental noise is generated by different sources and different actors which can be characterized as: the area or use of soil, type of vehicles and traffic levels and width of a certain environment in terms of barriers for propagation or dissipation of noise. Studies conducted in Bogota and Colombia have only assessed the levels of environment noise (Pacheco et al., 2009, Lopez et al., 2008, Gavinowich et al., 2006). The noise produced by vehicular traffic on a road is generated by three main sources: the point of contact between the tire and the road, the vehicle's engine and an exhaust duct (exhauster) thereof. The phenomenon of noise generated by tire-pavement interaction is still under study in most countries of the world. The state of art reports that important contributions to the understanding of the phenomenon in order to further mitigate the noise generated have been made. However, in the Latin American context this aspect has not been given the importance it deserves, and Colombia has not been the exception.

The results of this research, conducted by the author in four investigative phases developed with the support of students of civil and mechatronics engineering programs Pilot University of Colombia between 2010 and 2013, aim at contributing to the country's first study understand the phenomenon of noise pollution due to the tire-pavement interaction, consolidates and unifies the results aimed at obtaining measurable parameters. It also proposes a working model to estimate the noise generated by tire-pavement interaction, from the analysis of the main variables that make up the phenomenon and understanding. As part of the impact of the results, it is expected to articulate community outcomes to research projects related to sustainable infrastructure in the country (eg the Urban Development Institute of Bogotá, IDU) to enhance the proposed measures to mitigate this kind of pollution facing the problem directly

from the source. Besides the both formulation possible of district and/or national policy aimed to get sustainability in transport infrastructure and quality of life.

Keywords: Noise, Interaction, Pavement, tire-pavement

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1. PLANTEAMIENTO DE LA PREGUNTA O PROBLEMA, HIPÓTESIS Y SU JUSTIFICACIÓN

1.1.1. Pregunta de Investigación. ¿Cuál es la intensidad del ruido generado por la interacción llanta-pavimento en corredores viales de pavimento rígido y flexible de Bogotá D.C.?

1.1.2. Justificación. En Bogotá, según datos de la Secretaría Distrital de Medio Ambiente, entre los años 2003 y 2006, el ruido en la capital aumentó en 1,8 decibeles (dBA), al pasar de 73,6 a 75,4 dBA, en promedio. La Resolución 627 del 2006 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial permite para zonas residenciales, un máximo de 65 dBA; 70 para zonas comerciales y 75 para zonas industriales. Por lo anterior se requieren acciones inmediatas por parte de las autoridades para abatir el nivel de ruido actual (Revista Motor, 2007). Científicos de la Organización Mundial para la Salud - OMS han llevado a cabo estudios que señalan que la exposición a niveles de ruido de 50 o más decibelios son suficientes para originar problemas cardiovasculares.

El ruido ambiental es generado por diferentes fuentes y por distintos actores, dentro de los que se pueden caracterizar: la zona ó uso de suelo, tipo de vehículos y niveles de tráfico y amplitud de un determinado entorno en cuanto a barreras para la propagación o disipación del ruido. Estudios realizados en Bogotá y en Colombia, sólo han evaluado los niveles de ruido ambiental (Pacheco et al., 2009, López et al., 2008, Gavinowich et al., 2006). El ruido producido por el tráfico vehicular en una carretera es generado por tres fuentes principales: el punto de contacto entre la llanta y la carretera, el motor del vehículo y el ducto de evacuación de gases (exhosto) del mismo.

El ruido producido por la interacción llanta-pavimento participa con el 70 al 90 % de la energía sonora global generada cuando el vehículo transita a una

velocidad de 80 km/h (50 mi/h) ó superior (Caltrans, 2003). El fenómeno del ruido generado entre la interacción llanta-pavimento se encuentra aún en estudio en la mayor parte de los países del mundo (Estados Unidos, Europa) en donde se han realizado importantes contribuciones para el entendimiento del fenómeno y para avanzar en la mitigación del ruido que se genera. Sin embargo, en el contexto latinoamericano no se le ha dado la importancia que merece, éste es el caso específico de Colombia, en donde se cuenta con una normativa que limita la generación de ruido ambiental por zonas de acuerdo al uso del suelo.

Con la presente investigación se espera que se promueva política encaminada a la sostenibilidad en la infraestructura de transporte y calidad de vida.

Relacionándola con los elementos y factores que generan el ruido llanta-pavimento, se destacan:

- La superficie de rodadura
- Los niveles de tráfico y tipos de vehículos
- Tipología de llantas de los vehículos
- La velocidad de operación de los vehículos

Teniendo en cuenta lo anterior, se desea dar un aporte al primer estudio en el país enfocado a la comprensión del fenómeno de la contaminación sonora por efecto de la interacción llanta-pavimento.

1.1.3. Hipótesis. Los niveles de ruido generados por la interacción llanta-pavimento en corredores viales de pavimento rígido y flexible en la ciudad de Bogotá D.C. se ajustan a un modelo específico para su predicción.

1.2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO

1.2.1. Conceptos básicos sobre ruido. El ruido es definido como cualquier clase de sonido fuerte desagradable o no deseado, generado como subproducto del moderno estilo de vida de la sociedad. En este concepto están incluidas las características físicas del ruido y las psicofisiológicas del receptor (Min ambiente 2006), Dentro de la resolución 0627 de 2006 expedida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, se especifican diferentes clases de ruido; ruido de fondo, ruido específico, ruido de baja frecuencia. Otras definiciones lo catalogan como sonido generado por la vibración de las ondas de presión de sonido en el aire. Niveles de presión de sonido son utilizados para medir la intensidad de sonido y son descritos en términos de decibeles. El decibel (dB) es una unidad logarítmica que expresa la relación de un nivel de presión de sonido medido a un nivel estándar de referencia.

El sonido está compuesto de varias frecuencias, pero el oído humano no responde a todas las frecuencias. Se ha encontrado que la escala “A” (dBA) es la que mejor se aproxima a la frecuencia de respuesta del oído humano. La escala de decibeles se encuentra comprendida entre 0 dBA - el umbral del oído humano hasta 140 dBA - donde serios trastornos auditivos pueden ocurrir. El oído humano puede en promedio diferenciar entre dos niveles de sonido que se encuentran al menos a 3 dBA de diferencia en altitud. La tabla 1, muestra la escala y algunos niveles asociados con actividades diarias.

Debido a que la escala de decibeles es logarítmica, cuando se duplica la fuente generadora de ruido, el nivel de ruido sólo se incrementa en 3 dBA. Si se tiene una fuente generadora de ruido colocada a un metro de distancia generando 85 dBA, y esta distancia es duplicada se obtiene una disminución de 6 dBA. Los niveles de ruido en una carretera generalmente se encuentran entre 55 y 80 dBA medidos desde uno de los costados de la misma (Figura 1 y 2).

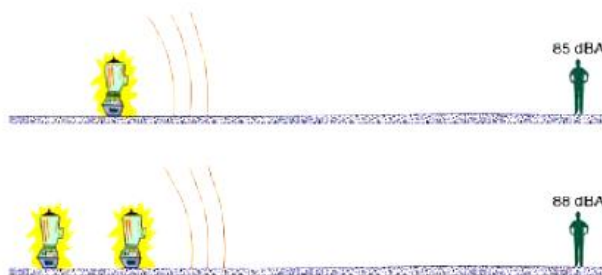


Figura 1. Efecto al adicionar fuentes de ruido. (Adaptado de WDOT 2005).

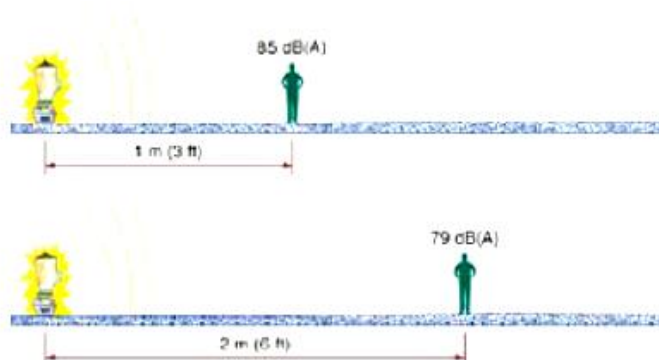


Figura 2. Efecto de la distancia en el ruido generado. (Adaptado de WDOT 2005).

Tabla 1. Niveles de ruido asociados con actividades comunes.

Fuente: Arizona DOT.

Actividad	Nivel de Ruido (dBA)
umbral del dolor	140
Avión en vuelo a 300 m de altitud	110
Cortadora de césped a 0.9 m	100
Gritos Altos	90
Camión diesel a 15 m	90
Motocicleta pasando a 15 m	85
licuadora a 0.9 m	85
Vehículo viajando a 90 km/h pasando a 15 m	80
Tráfico pesado a 90 m	60
Conversación normal	60
Corredor en silencio	40

1.2.2. ¿Por qué se produce el ruido en la interfaz entre la llanta y el pavimento?

El ruido de tráfico es aquel resultante del movimiento de vehículos sobre una carretera e incluye todas las posibles fuentes de ruido presentes en un vehículo. De acuerdo con la fuente el ruido puede clasificarse como **ruido de propulsión**, el cual incluye el motor, el escape, la entrada o admisión de aire y otros componentes del tren de potencia, el mismo es importante a bajas velocidades, aquellas por debajo de 50km/h; **ruido de interacción llanta-pavimento**, aquel generado por el movimiento de la llanta sobre el pavimento, siendo importante en el rango de velocidades comprendido entre 50 y 110 km/h; y **ruido aerodinámico**, que es causado por la turbulencia que genera el aire al moverse el vehículo a través del mismo y presente a muy altas velocidades, mayores a 110km/h. La causa principal del ruido de tráfico en vehículos livianos es la interacción entre el pavimento y la llanta del vehículo, que es apreciable a velocidades superiores a 50km/h (aproximadamente 30mph). Asimismo es importante tener presente el concepto de velocidad de cruce (crossover speed) a partir de la cual es dominante esta fuente de ruido sobre las restantes, además se puede entender como el umbral de velocidad sobre el cual son realmente importantes los asfaltos fono reductores o silentes, siendo la misma una función del tipo de vehículo y las condiciones de funcionamiento del mismo, es así como vehículos con motores silenciosos tiene este umbral más bajo y por tanto los pavimentos fono reductores son más efectivos (Rasmussen et al. 2007).

Se deben tener presente cuál es la relación entre estas fuentes de ruido y la velocidad de desplazamiento del móvil. La figura siguiente muestra cómo se pueden relacionar estos dos parámetros.

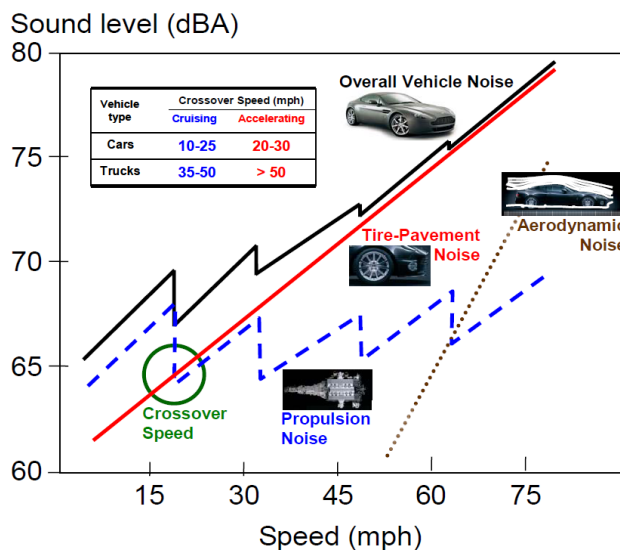
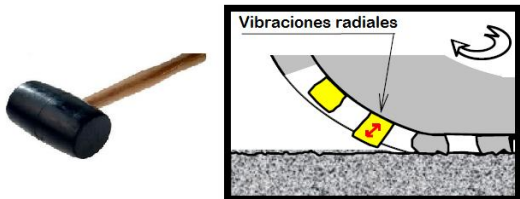
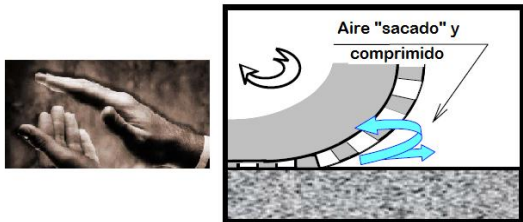


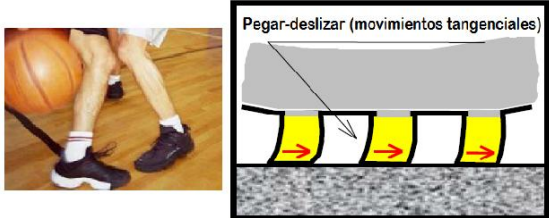
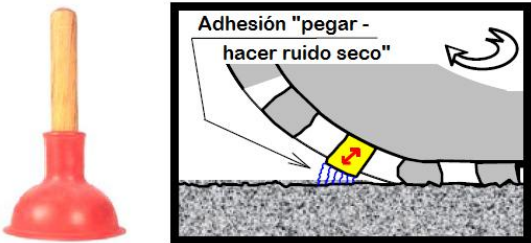
Figura 3. Efectos de la velocidad sobre el ruido vehicular y la velocidad de cruce. Fuente: Rasmussen, 2007

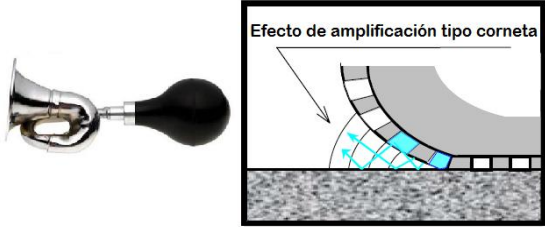
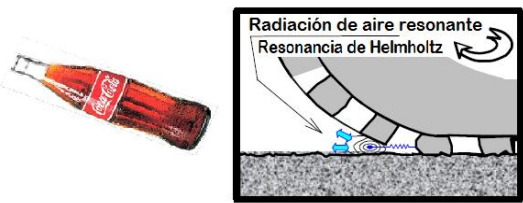
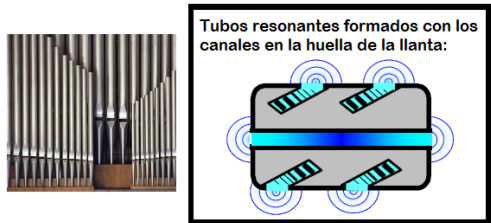
La interacción entre llanta pavimento es la que interesa en este trabajo ya que esta interacción puede causar el 90% del ruido total dependiendo de factores como las condiciones de tráfico, el tipo de vehículo y la forma de conducción (como el frenado, la aceleración del vehículo, el ascenso o la toma de curvas), las fuerzas de contacto varían en el tiempo lo cual produce vibraciones de la llanta radiando sonido, el avance de la llanta comprime aire, cuando ella impacta el pavimento, mientras que succiona cuando ella se aleja del suelo, lo cual hace que tanto llanta como suelo vibre (Sachakaml et al. 2007).


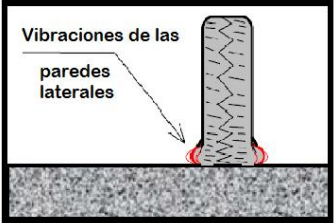

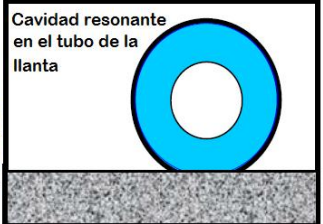
Son varios los mecanismos responsables de la generación de ruido en la interacción entre las llantas y el pavimento. En la tabla 2 se presenta un resumen de estos procesos de generación, junto con una breve explicación del mismo y un mecanismo o elemento que posee cierta similitud con el proceso, que permite un mayor entendimiento de la fuente generadora de ruido.

Tabla 2. Mecanismos de generación y amplificación del ruido debido a la interacción llanta/pavimento. Tomado y modificado de Rasmussen, 2007

Mecanismos de generación	
<p>Impacto de la banda de rodamiento (El martillo)</p> 	<p>A medida que la llanta rueda, el labrado de la banda de rodamiento y la textura del pavimento harán impactos individuales entre ellos. El ruido resultante puede ser visto como el proveniente de cientos de pequeños martillos golpeando a una determinada frecuencia, la cual dependerá de la velocidad del auto.</p>
<p>Bombero de aire (El aplauso)</p> 	<p>Entre la banda de rodamiento y el pavimento existen espacios llenos con aire, a medida que la rueda se mueve parte de este aire es extraído y otra parte es atrapado y comprimido. Un instante de tiempo después la cubierta pierde contacto con el pavimento y el aire atrapado es obligado a salir, y en algunos casos el aire es succionado de regreso. Todo esto ocurre cientos o miles de veces por segundo. Este proceso es similar a aplaudir. Silbar es otro ejemplo donde el aire es forzado a salir por una pequeña abertura, generando sonido.</p>

<p>Adherencia y deslizamiento (La zapatilla deportiva)</p> 	<p>Este tipo de sonido es producido en la medida que la cubierta rueda sobre el pavimento. El caucho continuamente se deforma y distorsiona por debajo de la llanta, lo cual hará que la cubierta se pegue o adhiera, pero de manera periódica se desliza si se alcanza el límite crítico. Este fenómeno ocurre miles de veces en un segundo, generando ruido de alta frecuencia. Este fenómeno es similar al producido por una zapatilla para deporte, como en el baloncesto.</p>
<p>Adherencia y chasquido (La copa de succión)</p> 	<p>Una copa de succión puede pegarse a una superficie lisa a causa de las fuerzas de adhesión y un vacío que se crea cuando el aire de la copa es sacado.</p> <p>Una banda de rodamiento interactúa con algunos pavimentos de una manera similar produciendo sonido.</p>
Mecanismos de amplificación	
<p>La corneta acústica Corneta</p>	<p>La geometría de la llanta y el pavimento en contacto incluye un segmento de aire en forma de cuña, abierta lateralmente, la cual multiplica las reflexiones del sonido generado cerca al cuello, de manera similar a</p>

	<p>como ocurre en una corneta musical o un megáfono. El resultado es una amplificación significativa, tanto hacia adelante como hacia atrás, con la distorsión de algunas frecuencias.</p>
<p>Resonador de Helmholtz (La botella)</p> 	<p>Una geometría similar a la de un resonador de Helmholtz puede ser hallada en la cuña que se forma donde la llanta y el pavimento se encuentran. En este caso la masa y el resorte, con el que se modela el resonador, se encuentran uno al lado del otro. El resultado es la amplificación de algunas frecuencias asociadas a la geometría de la llanta y el pavimento.</p>
<p>Tubo de resonancia (El órgano de tubos)</p> 	<p>En una llanta se pueden identificar geometrías que tienen forma de tubo, en las distintas láminas y surcos a medida que ellas son ceñidas a formarlos en distintos puntos debajo del punto de contacto. El sonido generado en estos tubos es amplificado por la geometría misma que poseen estos tubos.</p>
<p>Vibraciones de las paredes laterales (Plato de aluminio)</p>	<p>Debido a la dimensión de la pared lateral y a la deformación de la misma,</p>

 	<p>esta sirve como un mecanismo de amplificación para aquellos sonidos generados mediante los distintos mecanismos explicados previamente.</p>
<p style="text-align: center;">Cavidades resonantes (Globos)</p>  	<p>Cuando un globo es golpeado se genera un sonido distintivo similar a un zumbido. Esto mismo es cierto cuando una llanta es golpeada. Este sonido puede ser percibido mejor en el interior del vehículo ya que la geometría del mismo lo amplifica, razón por la cual es un ruido poco importante al exterior del mismo.</p>

1.2.3. Técnicas de medición de ruido en carreteras. Los ruidos generados por los vehículos en operación son fluctuantes, por tanto es necesario poderlos caracterizar de una manera simple para poder predecir el nivel de molestia asociado. El indicador más comúnmente utilizado es el “**Leq**”, el cual representa la media de la energía sonora percibida por un individuo en un intervalo de tiempo. Se puede calcular Leq para un minuto, una hora, un día, por medio de la ecuación (1), normalmente se utiliza el filtro de ponderación “A”, de manera que se escribe LAeq. El número entre paréntesis que sigue al LAeq indica el período durante el cual el nivel de sonido equivalente ha sido medido (Flórez et al, 2002).

Su formulación matemática es:

$$L_{Aeq}(T) = 10 \log \left(\frac{1}{T} \right) \int_T \left(\frac{P}{P_0} \right)^2 dt \quad (1)$$

Donde:

L_{Aeq} Media de la energía sonora ponderada

T Tiempo de duración de la medición

P Presión sonora instantánea en Pascales

P_0 Presión de referencia $2 \cdot 10^{-5}$ Pascales

dt diferencial de tiempo

1.2.3.1. Mediciones de Ruido en Carreteras. Para determinar el nivel de ruido producido por los vehículos por la interacción llanta – pavimento, se destacan dos métodos comúnmente utilizados. Estos métodos se encuentran especificados en la norma ISO 11819.

- **Procedimiento Estadístico de paso:** consiste en la colocación de micrófonos a una altura y distancia definida de la trayectoria de los vehículos, los micrófonos son ubicados a un lado de la carretera como se muestra en la Figura siguiente. Generalmente la distancia es de 15 m desde el eje de la carretera y el sonómetro es colocado a una altura de 1.5 m.



Figura 4. Procedimiento estadístico de paso para medición de niveles de ruido.

- **Método de Proximidad (Close Proximity method - CPX).** : El método consiste en colocar una llanta de prueba en un tráiler, el cual es remolcado por un vehículo de trabajo. Muy cerca de la llanta de prueba, a unos 0.1 – 0.5 m uno o más micrófonos son colocados (Figura siguiente). El nivel de ruido es medido como un promedio sobre cierto intervalo de tiempo, usualmente de 4 a 60 segundos. Este método es menos sensitivo al ruido producido por otros vehículos.



Figura 5. Procedimiento de proximidad – CPX para medición de niveles de ruido

En lo referente a ruido generado por el parque automotor existen métodos estandarizados para su medición entre los que se pueden mencionar los siguientes:

1. Respecto al ruido producido por el vehículo, sin caracterizar puntualmente la fuente generadora se tiene las siguientes normas:

- a. ISO 362-1:2007/Cor 1:2009 — Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles – Engineering method –Part 1: M and N categories (ISO 2007a). Esta norma presenta un método para la medición del ruido emitido por vehículos categorizados como tipo M y N, es decir, “vehículos a motor destinados al transporte de personas

(categoría M) o de mercancías (Categoría N) y que tengan por lo menos cuatro ruedas, o tres ruedas y un peso superior a 1 tonelada” (EURLex 1970), bajo condiciones típicas de tráfico urbano. Las especificaciones buscan reproducir el nivel de ruido generado por las principales fuentes de ruido durante conducción normal en tráfico urbano.

- b. ISO 362-2:2009 — Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles – Engineering method –Part 2: L category (ISO 2009). Esta norma es similar a la parte 1, salvo que el tipo de vehículo a medir es ahora clase L, “consistentes en ciclomotores y las motocicletas, así como los vehículos todo terreno (quads) y otros vehículos de poca cilindrada de tres o cuatro ruedas” (Comisión Europea).
- c. ISO 5130:2007 – Measurements of sound pressure level emitted by stationary road vehicles (ISO 2007b). Especifica el procedimiento, ambiente e instrumentación para la medición de niveles de presión sonora exteriores provenientes de vehículos rodados bajos condiciones estacionarias, produciendo una medida continua del SPL, ponderado A, sobre un rango de velocidades. Sólo se aplica en vehículos clase L, M y N dotados de motores de combustión interna.
- d. ISO 7188:1994 – Acoustics—Measurement of noise emitted by passenger cars under conditions representative of urban driving (ISO 1994b). Establece un método para medir el ruido emitido por carros de pasajeros en movimiento. El método se basa en estudios estadísticos del uso de carros en tráfico urbano.
- e. ISO 10844:1994 – Acoustics – Specification of test track for the purpose of measuring noise emitted by road vehicles (ISO 1994a). En ella se especifica los materiales, el diseño, la construcción y las propiedades de una superficie de prueba con la finalidad de minimizar la variaciones en las mediciones de ruido vehicular. Desarrollada particularmente para el uso con las normas ISO 362 e ISO 7188.

2. La propiedad acústica de absorción de superficies de rodamiento puede ser medida de acuerdo con las normas

- a. ISO 13472-1:2002 —Acoustics— Measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ –Part 1: Extended surface method (ISO 2002). Este método describe la forma de medir el coeficiente de absorción in situ de carreteras en función de la frecuencia en el rango de 250 a 4000Hz.
- b. ISO 13472-2:2010 —Acoustics— Measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ –Part 2: Spot method for reflective surface (ISO 2010). Determina el método de prueba para medir el coeficiente de absorción de carreteras in situ en bandas de 1/3-octava en el rango de 250 a 1600Hz. Se especifica este método para carreteras densas y semidensas.
- c. ISO 10534-1:1996 – Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 1: Method using standing wave ratio (ISO 1996). Se describe un método para determinar el coeficiente de absorción acústica, el factor de reflexión la impedancia o admitancia de materiales, mediante la evaluación del patrón de onda estacionaria de una onda plana en un tubo, el cual es generado por la onda incidente y la onda reflejada.
- d. ISO 10534-2:1998 – Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 1: Transfer-function method (ISO 1998). Este método hace uso de un tubo de impedancia, dos micrófonos y un sistema digital de análisis en frecuencia para determinar el coeficiente de absorción acústica bajo incidencia normal.

3. En lo relativo a la caracterización de los pavimentos:

- a. ISO 13473-1:1997 – Characterization of pavement texture by use of surface profiles –Part 1: Determination of Mean Profile Depth (ISO 1997b). Se describe el método para determinar la profundidad promedio de una superficie de macrotextura de un pavimento mediante la medición de la curva del perfil de una superficie y calculando el espesor de la textura de acuerdo con el perfil. Está relacionada con la ISO 10844:1994. Es aconsejable también hacer uso de las partes 2, 3 4 y 5.

4. La interacción entre la llanta y el pavimento se encuentran estandarizados por las normas relacionadas a continuación:

- a. ISO 11819-1—Methods for measuring the influence of road surface on traffic noise—Part 1: The statistical pass-by-method (ISO 1997a); esta norma describe un método de comparación del ruido de tráfico de diferentes superficies de rodamiento con distintas composiciones del tráfico con el propósito de evaluar diferentes tipos de carreteras. Los niveles sonoros que representan los vehículos livianos y los pesados a determinadas velocidades son asignados a la superficie de rodamiento. El método es aplicable par tráfico que mantiene una velocidad constante de 50Km/h o más. Para condiciones de tráfico diferentes, en las cuales no hay libre flujo, la interacción llanta-pavimento carece de importancia. El método de conteo estadístico o Statistical Pass-By (SPB) es usado con dos propósitos. El primero para clasificar las superficies de acuerdo con la influencia del tráfico rodado y el segundo para evaluar la influencia del ruido de tráfico de diferentes superficies en sitios particulares independientemente de la condición y el envejecimiento.
- b. ISO 11819-2—Methods for measuring the influence of road surface on traffic noise—Part 2: Close proximity method (En proceso)(Freiburghaus 2011); hace uso de un remolque adecuado

acústicamente para que asemeje una cámara semianecoica, micrófonos o sondas de intensidad para determinar el ruido generado al interior de la cámara debido a la interacción entre llanta y pavimento.

1.2.4. Estado del conocimiento. Estudiar el fenómeno del ruido producido por la operación del transporte en carreteras es una tarea poco sencilla, que se debe apoyar con trabajos estadísticos sobre las mediciones realizadas con métodos estandarizados.

Para los ambientalistas, el estudio y control del ruido tiene sentido en cuanto a su utilidad para alcanzar una cierta protección de la calidad del ambiente sonoro. Los sonidos son analizados para determinar los niveles en que se introducen en determinadas áreas y situaciones y conocer el grado de molestia sobre la población (Flórez et al, 2002).

Conscientes de la gran molestia y contaminación que genera el ruido por interacción llanta pavimento, ingenieros investigadores han abordado el tema de diferentes maneras. Grandes inversiones son realizadas anualmente en diferentes estados en los Estados Unidos – EU con el fin de aislar las zonas residenciales de las autopistas las cuales manejan flujos cercanos a los 150.000 vehículos/día a altas velocidades (Zareh et al 2006). Para disminuir el impacto de estos grandes volúmenes de autos, se han utilizado muros de ruido (Noise Walls) o incluso grandes siembras de árboles que ayudan a disipar el ruido generado por el parque automotor (Figura siguiente).



Figura 6. Muros de ruido en autopistas interestatales (Noise Walls).

Fuente: Rubber Pavement Association.

Sin embargo, con estas obras se está controlando el problema de manera indirecta y no se aborda desde la fuente, es decir, desde la interacción llanta - pavimento.

El ruido producido por el tráfico vehicular en una carretera es generado por tres fuentes principales: el punto de contacto entre la llanta y la carretera, el motor del vehículo y el ducto de evacuación de gases (exhosto) del mismo. El ruido producido por la interacción llanta-pavimento participa con el 70 al 90 % de la energía sonora global generada cuando el vehículo transita a una velocidad de 80 km/h (50 m/h) o superior (Caltrans, 2003).

La frecuencia y la intensidad del ruido llanta-pavimento depende de muchos factores: la dureza de la superficie de la carretera, el tamaño de las llantas, la cantidad de vacíos en la superficie de la carretera, la velocidad de los vehículos que transitan, las juntas en los pavimentos rígidos, y la configuración de corteza de las llantas (tipo de huella). Se encuentra ampliamente demostrado que los vehículos livianos producen menos ruido que camiones sencillos, y estos a su vez son más silenciosos que los camiones multiejes. Se conocen valores de 5.6 dBA de diferencia entre un vehículo liviano (carro) y un vehículo con eje doble o tándem (WDOT, 2005).

1.2.4.1. Alternativas en pavimentos para disminuir ruido llanta – pavimento. El avance en todo el mundo en las diferentes clases de pavimentos es notable. Se han observado experiencias de igual magnitud en pavimentos flexibles como en rígidos.

1.2.4.1.1. Pavimentos rígidos (Portland Cement Concrete Pavements – PCCP). Entre los métodos utilizados para disminuir el ruido llanta – pavimento en pavimento en concreto hidráulico o estructuras rígidas, se destacan los de Texturas Convencional y los de Texturas por discos de Diamante.

Los pavimentos con texturas convencionales, se encuentran de dos grandes clases. Con texturizado por arrastre o barrido (Drag Textures) y por moldeado (Tined Textures). Se identifican por tener una apariencia de huella de escoba con una textura con ranuras entre 1.5 mm y 3 mm de profundidad (Ver Figura siguiente).



Figura 7. Textura de arrastre artificial. (Drag Textures).

Las principales preocupaciones en esta clase de pavimentos, están relacionadas con la resistencia al deslizamiento, y su uso está limitado para carreteras con velocidades menores a los 72 km/h (WDOT, 2005). El desempeño en cuanto a ruido y fricción es comparable con el de una mezcla

asfáltica convencional en caliente (Cackler et al, 2006). El texturizado para cada clase de pavimento, se utiliza tanto en sentido transversal como horizontal. Diferentes estudios han mostrado que la profundidad en la ranura o textura, al igual que el ancho de las mismas, tiene incidencia directa en la generación de ruido. Entre los pavimentos con texturas transversales y longitudinales, se destacan los pavimentos con textura longitudinal por generar niveles de ruido mucho más bajos.

Un segundo gran grupo de pavimentos en concreto hidráulico, son aquellos desgastados por cortadoras con discos de diamante. Esta técnica remueve una delgada capa de concreto endurecido utilizando discos diamantados con un mínimo espaciado. Estos discos pueden generar cortes entre 164 y 197 ranuras/m, como se puede observar en la Figura siguiente (ACPA 2004).

Burgé et al, 2001, realizaron mediciones de ruido en secciones con ranuras longitudinales y transversales, observando que las secciones con ranuras longitudinales presentaban niveles de ruido inferiores a los determinados en las secciones con ranura transversal, la diferencia en el nivel de ruido se encontró en el orden de 2 a 5 dBA. Consecuentemente con lo descrito en las diferentes clases de texturas en pavimentos rígidos, juegan un papel fundamental la geometría de las ranuras (ancho, profundidad, espaciamiento), en el desempeño positivo o negativo en relación con el nivel de ruido producido.



Figura 8. Pavimento rígido con textura realizada con Discos Diamantados

1.2.4.1.2. Pavimentos flexibles. En términos generales se evidencia en la literatura (WDOT, 2005, NCHRP Synthesis 268) que los pavimentos con mezclas asfálticas son más silenciosos que sus similares en concreto hidráulico. Esta diferencia ha sido valorada y se cuenta con cifras que muestran que los pavimentos o rodaduras flexibles producen menos ruido entre 2 y 3 dBA. Como fue expuesto previamente una reducción de este orden, se debe considerar como muy significativa, teniendo en cuenta que por ser la escala de ruido de tipo logarítmica, esa reducción es equivalente a duplicar la distancia entre la fuente y el receptor ó de reducir el volumen de tráfico en 50% ó quizás la velocidad de circulación en un 25%.

Dentro de las alternativas de rodaduras utilizadas con ligantes asfálticos con el objetivo de abatir los niveles de ruido en las carreteras, se encuentran las mezclas de gradación abierta (Open Graded Friction Course - OGFC), mezclas asfálticas con caucho producto de llantas recicladas (Asphalt Rubber Hot Mix - ARHM), AR-ACFC (Asphalt Rubber-Asphalt Concrete Friction Course), y el micro-aglomerado (Stone Matrix Asphalt – SMA).

La mayoría de los pavimentos que presentan bajos niveles de ruido cuentan con textura negativa, esta se refiere a pequeños huecos o vacíos superficiales que reducen el ruido. Las mezclas OGFC utilizan pequeños huecos o vacíos de aire para proveer una textura que absorba el ruido. Las OGFC debido a que son sólo un tipo de granulometría, pueden ser producidas con asfaltos convencionales, modificados con polímeros o asfaltos modificados con residuos de llantas (rubberized asphalts).

Las mezclas tipo OGFC como su nombre lo indican difieren de la mezclas densas en caliente por el porcentaje de vacíos de la misma. En las mezclas OGFC los porcentajes de vacíos se encuentran en el 10 y 22 % y este porcentaje varía muy poco a lo largo del tiempo de servicio (WDOT, 2005). La apariencia de esta clase de mezcla comparada con una mezcla densa convencional se puede apreciar en la Figura siguiente. Ejemplos de esta clase de gradación se muestran en la tabla siguiente. Dentro de las propiedades de diseño de esta clase de mezcla se observa que presentan valores de vacíos en el agregado mineral (VMA) cercanos al 30% y vacíos con aire alrededor de 20%.

Tabla 3. Ejemplos de granulometrías OGFC. (Smith, 2000)

Tamaño de Tamiz	3/8 " (9.525 mm)	1/2 " (12.70)
1/2 " (12.70 mm)	100	95 – 100
3/8 " (9.525 mm)	85 – 100	75 – 95
No. 4 (6.35 mm)	22 – 55	20 – 45
No. 8 (2.36 mm)	42125	5 – 15
No. 30 (600 um)	0 – 10	0 – 10
No. 50 (300 um)	---	---
No. 200 (75 um)	0 – 5	0 – 5

De acuerdo con el documento NCHRP Synthesis 268, las mezclas OGFC tienen un potencial de reducción de ruido comprendido entre 1 y 9 dBA en comparación con una mezcla densa en caliente convencional. Sin embargo, las mezclas OGFC no sólo tienen la ventaja de abatir el ruido generado por la interacción llanta pavimento, también son mundialmente reconocidas por ofrecer una buena resistencia al deslizamiento, evitar el hidroplaneo y el efecto de splash en las carreteras en condiciones de lluvia como se observa en la Figura siguiente, en donde se muestra el carril externo con una sobrecarpeta de una mezcla abierta OGFC.



Figura 9. Apariencia de mezcla con gradación abierta OGFC a izquierda vs mezcla densa a derecha.

En la tabla siguiente, se pueden observar resultados de mediciones tomadas a velocidades de 88 km/h y 104 km/h en diferentes autopistas en el estado de Arizona – EU, en donde se comparan dos clases de rodaduras: una AR-ACFC y una PCC (Portland Cement Concrete), más conocidas como rodadura en concreto hidráulico, observándose una marcada diferencia que oscila entre 2 y 3 dBA a una velocidad de 88 km/h.



Figura 10. Carril externo en sobrecarpeta con mezcla OGFC vs carriles centrales en mezcla densa convencional.

Tabla 4. Resultados de pruebas de niveles de ruido en el Estado de Arizona.
(Adaptado de WDOT, 2005)

Localización	Tipo de superficie	Año de Construcción	Media en dBA a 88 km/h	Media en dBA a 104 km/h
I-10 W PHOENIX	AR-ACFC	1994	94,6	97,2
	PCC, barrido*	1994	97,6	100,4
	AR-ACFC	1994	94,5	97
I-17 PHOENIX	AR-ACFC	1994	92,7	95,5
	PCC, desgastada*	1991	96,6	-
	AR-ACFC	1992	94,4	95,9
I-10 TUCSON	PCC, desgastada*	1989	96,7	99
	PCC, desgastada*	1983	98,2	100,8
I-19 TUCSON	AR-ACFC	1992	92,3	94,7
	AR-ACFC	1988	93,2	95,6
	PCC, Tined*	1988	95,2	97,5

* Tipo de textura

1.2.4.2. Aspectos generales adicionales. Algunos de ellos tratan sobre procesos de medición del ruido producido por la interacción llanta/pavimento, otros sobre las mejoras introducidas en los pavimentos para aumentar su capacidad de absorción energética.

Los métodos de paso estadístico (Statistical Pass-By, SPB) y de proximidad (Close Proximity method , CPX) son los más reportados recientemente, en especial el último es del interés para este trabajo de investigación, ya que la norma aún está en proceso de estudio, tal como lo establece ISO (Freiburghaus 2011), indicando que se encuentra en la etapa preliminar de producción numerada como 00.60 y porque es un método que tiene los micrófonos de medición a bordo.

En Suecia se desarrolló un sistema de un remolque de una sola llanta como el mostrado en la figura siguiente (Höjer et al.)

El remolque consiste de una viga que se puede mover de manera telescópica, lo cual permite compactar el sistema para transportar la llanta de prueba al sitio de medición, extender el sistema y poner la llanta en tierra de una manera sencilla, este diseño permite mayor economía y facilidad en el transporte y montaje de varias muestras, la disminución de los efectos del vehículo sobre el sistema llanta/pavimento, ya que por el hecho de estar la llanta en un encerramiento que se produzcan reflexiones, las cuales cambian la directividad y la potencia sonora total emitida por el sistema. Lo anterior haría necesario calcular las influencias de este tipo de encerramiento. Este remolque está diseñado para analizar la influencia de la carga sobre la interacción entre la llanta y el pavimento, mediante el uso de masas se controla de manera discreta esta carga. El remolque evita la interacción del ruido producido por las cuatro llantas del vehículo de tracción y el pavimento con el ruido producido por la llanta de prueba. Esta interacción consiste en el aumento del nivel de presión sonora y la distorsión del patrón de directividad.



Figura 11. Sistema de medición bajo norma ISO 11819-2 en Suecia, se debe observar que no tiene una cámara semianecoica para evitar las influencias de las reflexiones provenientes del suelo. Fuente: Höjer, 2008.

Se realizan mediciones o monitoreo de la velocidad de la llanta mediante el uso de un sistema de GPS, el cual almacena la velocidad y la posición junto con un código de tiempo (sincronizado con el sistema de medición sonoro) en una memoria flash.

Los autores establecen que deben existir ciertas condiciones de estabilidad dinámica y de balanceo para evitar la aparición de fuerzas laterales en la interacción entre la llanta y el pavimento, aseguran una frecuencia de resonancia de torsión de 2Hz cuando la longitud de la viga es de 8m.

En (van Leewen et al.), se presenta un sistema embarcado para la medición de la interacción llanta/pavimento. Uno de los argumentos que establecen para el uso de la técnica de CPX es el hecho que "... la prueba combinada de la medición de la absorción y de la textura del pavimento no es suficiente para predecir y monitorear la reducción de ruido."

Asimismo afirman que es importante tener un conocimiento claro de los principios acústicos que suceden. Uno de los aspectos a tener en cuenta es que el "... el efecto de un encerramiento no tiene ventaja acústica. Además un encerramiento puede generar resultados menos precisos."

Se mide el nivel sonoro y se halla el promedio para cada una de las llantas de referencia a velocidades de referencia. De los resultados de dos o cuatro llantas de prueba se puede determinar el Índice de Proximidad (CPXI).

Los patrones de las llantas establecidos por la norma ISO se muestran en la figura.



Figura 12. Patrones de labrado de la llanta de acuerdo con la norma ISO 11819-2. Fuente: Van Leewen, 2011

“Para las mediciones se deben usar al menos dos micrófonos. Estos dos micrófonos miden simultáneamente en posiciones fijas relativas a la llanta de prueba. La distancia horizontal desde el plano de la pared lateral más cercana es de 20 cm. La altura sobre el nivel del pavimento es de 10 cm. El micrófono delantero se montará a un ángulo de $45^{\circ} \pm 5^{\circ}$ respecto a la dirección de movimiento y el micrófono posterior estará a un ángulo de $135^{\circ} \pm 5^{\circ}$ respecto a la dirección de movimiento. La figura siguiente muestra una fotografía del remolque CPX con dos micrófonos. La posición exacta es muy importante y es descrito en el estándar ISO que la posición del micrófono debe ser verificada de manera regular. Por ejemplo cada vez que la llanta de prueba es cambiada o una calibración es hecha”.



Figura 13. Sistema de posicionamiento de los micrófonos en el sistema CPX.

Fuente: Van Leewen, 2011

“La medición es relativamente sencilla. Cuando se conduce a una velocidad constante (calibrada) el nivel de ruido es medido. El promedio de los niveles de presión sonora ponderados A emitidos por dos o cuatro llantas de referencia específicos son medidos en una distancia arbitraria sobre el pavimento.”

“Esas mediciones son hechas para determinar el “nivel sonoro llanta/pavimento” a una o más velocidades de referencia (50, 80 y 110Km/h). Esto se ha logrado mediante las pruebas a, o cercanas a, una de las velocidades de referencia, o mediante pruebas sobre un rango amplio de velocidades y usando un método apropiado de normalización para las desviaciones de la velocidad.”

“Como se mencionó, el método CPX puede ser usado en dos variantes, dependiendo del número de llantas de referencia y del propósito de la medición. El “método investigativo” es el principal y se basa en el uso de las cuatro llantas de referencia. El “método de encuesta” hace uso de solo dos llantas de referencia. El método investigativo tiene mayor precisión pero emplea más tiempo para realizar que el método de encuesta. El método de encuesta es usado sobre todo cuando se mide tramos muy largos de carreteras.”

El Remolque CPX diseñado e implementado por DGMR en cooperación con Adviesburo Jos Reubsaet es el producto de diez años de trabajo, en los cuales la mayoría de las mediciones fueron hechas para determinar el nivel de desarrollo de superficies de carreteras silenciosas como los asfaltos porosos, asfaltos porosos de dos capas y capas delgadas.

El diseño es cuidadosamente elaborado teniendo en cuenta varios detalles entre los cuales cabe mencionar los siguientes:

1. La ausencia de un encerramiento, es decir el remolque es abierto ya que se halló que el efecto de atenuación del ruido en el interior de la cabina era irrelevante. El aire libre da la mejor medición en campo libre comparable con la obtenida en la mejor cámara anecóica.
2. De manera similar, el flujo de aire alrededor del micrófono fue medido y encontrado despreciable.
3. Otro aspecto tener en cuenta es la posible perturbación generada por el tráfico existente, que también se encontró insignificante bajo condiciones normales de operación, sin embargo es un aspecto a tener presente en las mediciones.
4. El centro de masa es bajo, la carga sobre la llanta debido al peso del tráiler está en un rango pequeño de variaciones.
5. Las suspensiones no producen ruido, al igual que los frenos.

La principal conclusión del trabajo de Van Leewen, es la afirmación acerca de que no es necesario tener la cámara anecóica o semianecoica, ya que las incertidumbres podrían aumentar debido al efecto de las reflexiones durante las mediciones.

En varios estados de la unión americana se han desarrollado mediciones que propenden por establecer el nivel de ruido generado por la interacción llanta/pavimento y algunas medidas para su mitigación, como se establece en (McNermey et al. 2000), (Bennert et al. 2004), (Rasmussen et al. 2009). En Europa se cuenta con estudios como el SILENCE (Descornet 2006), HARMONOISE y SILVIA en los que se determinan el estado del arte en lo referente a la clasificación de superficies de rodadura con respecto a su influencia en el ruido de tráfico en los países miembros de la Unión Europea. Asimismo existen reportes de trabajos de este tipo en Australia (Pugn et al.

2008), (Adams et al.), con igual finalidad que en USA, de determinar el nivel de ruido generado por los pavimentos existentes y las nuevas mezclas

Cho y Mun, (Cho et al. 2008) implementaron un método para determinar los niveles de potencia sonora generados por diversos tipos de vehículos y causantes del ruido de tráfico rodado, los cuales son usados para modelar el ruido en exteriores. Los niveles de presión sonora fueron medidos de acuerdo con la ISO 11819-1, sin embargo para reducir la incertidumbre se hizo un gran número de estas mediciones. Aplican un método invariante del CPX denominado por ellos como NCPX (Novel Close Proximity Method) ubicando micrófonos superficiales en distintos vehículos que incluyen desde los autos compactos hasta los camiones de cuatro ejes, además del tráiler del método CPX. El principio del NCPS se basa en la medición en campo cercano el tren de potencia y la interacción entre la llanta y el pavimento. Uno de los resultados interesantes que hallaron es que el nivel de potencia sonora L_{Aeq} medidos, y que fueron obtenidos en cuatro posiciones diferentes de llanta para un camión de tres ejes sobre asfalto denso en lo relativo al número de vacíos, tiene un patrón similar en las cuatro posiciones con respecto a la frecuencia y la velocidad del automóvil, con lo cual los autores concluyen que se puede determinar un único valor, que caracterizará al móvil, mediante el cálculo del promedio de los niveles medidos en las cuatro posiciones.

No solo los dos métodos estandarizados por ISO han sido usados para la determinación de los niveles sonoros asociados con esta fuente. En el inter-noise de 2003, (Bernhard et al.) presenta el desarrollo de un aparato de pruebas llanta/pavimento (TPTA, por sus siglas en inglés), el cual se convierte en un método alternativo para realizar investigaciones in situ acerca de esta fuente de ruido manteniendo un ambiente controlado. En la figura siguiente se muestra que el aparato consiste de un cilindro estacionario de 3.7m de diámetro. Segmentos de pavimento con un espesor de aproximadamente 20cm se montan sobre la superficie externa del cilindro. El dispositivo tiene dos brazos giratorios, sobre sus extremos se montan las llantas y se someten a una carga

de 4.45kN. El sistema se monta en una cámara semianecoica que ofrece el control de temperatura y humedad.

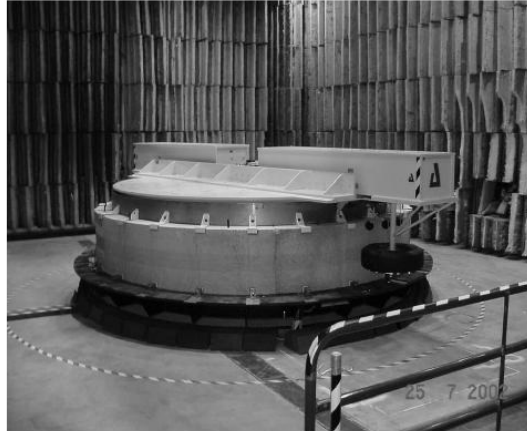


Figura 14. Sistema de cilindro rotatorio para medir el ruido generado por la interacción entre la llanta y el pavimento. Fuente: Bernhard, 2011

Por otro lado se ha enfocado la solución del problema en implementar mejoras a los pavimentos para realizar este proceso se parte de la medición de la absorción acústica y la simulación de pavimentos con diferentes números de capas; en la mayoría de ellas se comparan los asfaltos producidos de manera convencional, generalmente de gradación semidensa (gap graded) y nuevas propuestas en las cuales se varían la composición o se altera el material aditivo con el uso de caucho.

Existen varios parámetros para caracterizar acústicamente un material homogéneo e isotrópico como el coeficiente de absorción, el coeficiente de reflexión, la impedancia acústica, la velocidad de propagación y el coeficiente de reducción de ruido (NRC). La principal característica a medir o cuantificar es la de la absorción acústica, este proceso se puede realizar en el medio o en las fronteras. Si se realiza en el medio se tienen tres tipos de pérdidas, de mayor a menor importancia:

1. pérdidas viscosas, las cuales suceden en cualquier punto donde exista movimiento relativo entre segmentos contiguos del medio, como la existente

durante la deformación por cizallamiento o las compresiones y expansiones que acompañan a la transmisión de la onda sonora,

2. pérdidas por conducción calorífica que resultan de la conducción de energía térmica desde condensaciones a mayor temperatura hacia rarefacciones a menor temperatura, y;
3. pérdidas asociadas con procesos moleculares internos, en dichos procesos participan la conversión de energía cinética de las moléculas en (1) energía potencial almacenada (como en el reordenamiento estructural de moléculas adyacentes), (2) energías rotacional y vibratoria, para moléculas poliatómicas y (3) energías de asociación y disociación (Kinsler et al. 2000).

La absorción acústica se determina básica como la relación entre la energía incidente sobre el material y la energía absorbida por el material. Para los métodos de medición que hacen uso de tubos de onda estacionaria, se define como $\alpha = 1 - \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$ con $n = \frac{p_{max}}{p_{min}}$, siendo p_{max} y p_{min} las presiones máximas y mínimas en el tubo.

En el 2003, la Universidad de Rhode Island, desarrolló un trabajo en el cual se estudió el efecto de agregar cenoeferas, que consisten en microbalones cerámicos huecos, en este caso de silicato de aluminio. Se analiza su efecto sobre las propiedades acústicas de la matriz de cemento y el asfalto de concreto (Tiwari et al. 2004). Las muestras fueron hechas usando cemento Portland y cenoeferas de diámetro entre 10 a 300 μ m, las variaciones de las fracciones de volumen fueron de 0 a 70% en incrementos de 10%. Las muestras tienen longitudes de 25, 50 y 75mm y diámetros de 30 y 100mm. La relación agua y cemento fue siempre de 0.4. Al construir las muestras se tiene en cuenta que se hace uso de agregados gruesos y finos (arena) en diferentes gradaciones y aditivo asfáltico (6% por peso), en el asfalto solamente fue remplazado el agregado fino cuyo diámetro fuera menor de 300 μ m por las cenoeferas en los porcentajes establecidos anteriormente. Entre los resultados hallados se tiene que existe una disminución de la densidad tanto de la matriz de cemento (40%) como del asfalto de concreto (17%) a medida que se

aumenta el porcentaje de cenoasferas; en cuanto a la velocidad se observa que la misma permanece prácticamente constante a pesar que la densidad disminuyó, lo cual implica un aumento en el módulo de elasticidad de la muestra, respecto a la absorción se halló que existe un aumento en la misma cuando el porcentaje de las cenoasferas se varió entre 0 y 40%, mientras que disminuyo la variar la composición entre 50 a 70%. Se observa la máxima curva de absorción en la fracción de volumen de 40% de cenoasferas. En la figura siguiente se muestra el comportamiento de la absorción acústica en función de la frecuencia para diferentes porcentajes volumétricos de cenoasferas.

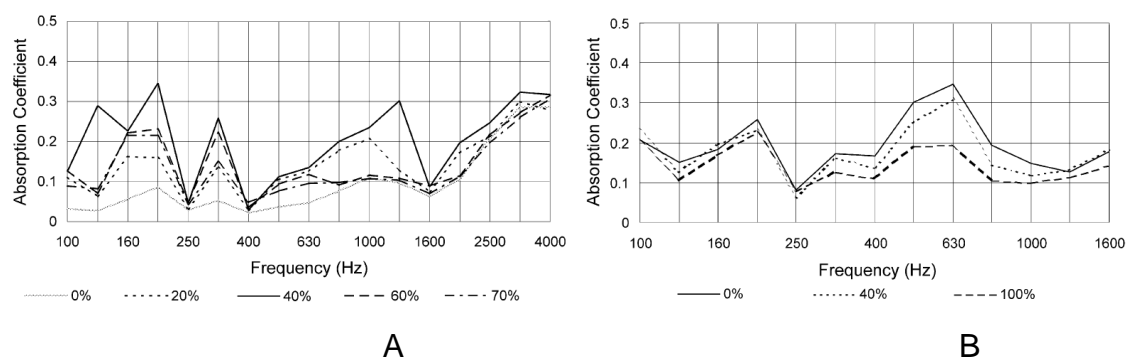


Figura 15. Coeficiente de absorción acústica como una función de la fracción volumétrica de cenoasferas (a) para una muestra de un cemento enriquecido de 255m de longitud y (b) para una muestra de asfalto de 64mm de espesor.

Fuente: Tiwari, 2004

En Portugal se realizó la medición del coeficiente de absorción acústica de pavimentos semidensos (Freitas et al.), debido que los materiales porosos tienen buenas características de absorción, no solo por la cantidad de cámaras de aire que contienen, sino también a por su resistencia al flujo. Para esta prueba se hizo la medición siguiendo las recomendaciones de la norma ISO 10534-1, haciendo uso del tubo de Kundt o de impedancia. Se hicieron ensayos con seis muestras, cada una de ellas resultantes de la combinación de dos tipos de mezclas semidensas y tres tipos de asfalto bituminosos. Una de las mezclas se caracteriza por su alto contenido de vacíos (18%) mientras que la segunda

tiene un número de vacíos bajo (menor al 5%). La capa de bitumen se clasificó de acuerdo con la cantidad de caucho que tenía como alto (18%, respecto al peso del asfalto), medio (10%) o cero. Los resultados obtenidos son los siguientes: a) como se esperaba el coeficiente de absorción bajo incidencia normal es mucho mayor en las muestras con mayor porcentaje de vacíos; b) ambas muestras (30mm y 79mm de espesor) muestran un coeficiente de absorción mayor en aquellas con mayor porcentaje de vacíos, sin embargo la muestra de 79mm de espesor presenta un coeficiente de absorción mucho más alto en bajas frecuencias (por debajo de 315Hz) ; c) para muestras con alto porcentaje de vacíos, el contenido del 10% de caucho muestra el más alto coeficiente de absorción, sin embargo, este resultado no indica que la atenuación del sonido por el uso de un contenido de caucho sea más efectivo, es decir, esta composición de caucho no mejora la absorción. El caucho puede mejorar la impedancia mecánica entre la llanta y el pavimento.

Existen trabajos de tipo teórico en los cuales se desarrollan modelos de absorción acústica, como el hecho en Korea (Kim et al. 2010). En este trabajo se plantea un modelo de estructura cristalina uniforme. La red consta de paneles perforados formados por las capas de agregados y espacios de aire entre los paneles. La composición de los agregados afectará el espesor de estas capas de aire. Se hallan los parámetros necesarios para calcular la absorción acústica. En general, el autor muestra como el modelo tiende a describir de manera razonable los resultados de la medición de la absorción, hecha según el método ISO 10534-2; en la mayoría de los casos, como se observa en la Figura siguiente.

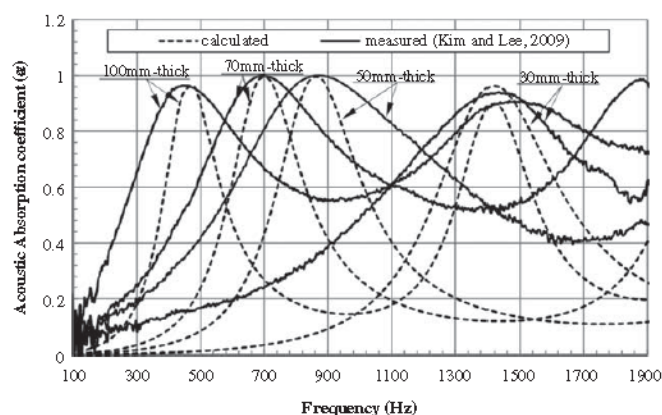


Figura 16. Comparación de los espectros de absorción acústica calculados y medidos para $r=5.25\text{mm}$, $d=1.01\text{mm}$, $\kappa=1.1$, $m=1.00$. Fuente: Kim, 2010.

Al variar la tasa de vacíos, como el espesor de la muestra, se observa que la medición y el modelo de simulación se ajustan bastante bien en lo que respecta a la frecuencia donde se presenta el máximo de absorción. Además concluye que la curva de absorción es dependiente de la gradación del agregado en lo referente a su máximo, pero no a la frecuencia en la cual se presenta, la cual permanece invariante. El modelo falla cuando se usan agregados con lata gradación o aditivos con otro tamaño de agregado. Existe una tendencia a la presencia de dos picos de máxima absorción, siendo el segundo más sensible, tanto en amplitud como en frecuencia, al tamaño de los vacíos, asimismo con una tasa del 30% de vacíos se alcanza el máximo de absorción acústica ($\alpha=1$). Por otro lado se está trabajando en el desarrollo de nuevas mezclas, que permitan mantener las condiciones mecánicas requeridas para cada tipo de pavimento, de acuerdo a su uso; y aumentar la absorción acústica, mediante el aumento de la porosidad del asfalto o el concreto. Es así como en china se han desarrollado nuevos métodos de diseño de mezclas de asfaltos fonoreductores (Ren et al. 2009). En esta investigación se diseñaron mezclas porosas de asfalto reductor de ruido de acuerdo con la gradación tradicional del agregado y la nueva propuesta de gradación. Para realizar este trabajo se escogieron tres tipos de compuestos así: compuesto 1, que contiene 51% de basalto 10-15, 24% basalto 5-10, 13% basalto 3-5, 8% arena, 4% relleno; compuesto 2, que

contiene 53% de basalto 10-15, 24% basalto 5-10, 10% basalto 3-5, 8% arena, 5% relleno; compuesto 3, que contiene 55% de basalto 10-15, 26% basalto 5-10, 7% basalto 3-5, 8% arena, 4% relleno. De manera experimental se determina, de acuerdo con las curvas de gradación del agregado y la reducción del índice de pérdida de dispersión, la composición óptima que deberá tener un pavimento que presentará características fonoreductoras, obteniendo los siguientes compuestos: compuesto 1, que contiene 39% de basalto 10-15, 47% basalto 5-10, 8% basalto 3-5, 3% arena, 3% relleno; compuesto 2, que contiene 43% de basalto 10-15, 47% basalto 5-10, 4% basalto 3-5, 3% arena, 3% relleno; compuesto 3, que contiene 47% de basalto 10-15, 47% basalto 5-10, 0% basalto 3-5, 3% arena, 3% relleno. Como conclusión de este trabajo se halla que si el flujo vehicular era bajo (243 vehículos/hora) el L_{eq} (dBA) y L_{50} se reducen en 4.2 y 5.6dB respectivamente.

Recientemente se ha trabajado en el análisis de las fuerzas de contacto que actúan sobre la interfaz con la finalidad de predecir el ruido que se genera, debido a la textura del pavimento y la velocidad del automóvil, correlacionando los resultados con mediciones hechas previamente por el método CPX (Cesbron et al. 2009), dichos resultados sirven para el modelado del ruido generado, caracterización de la fuente para incluirlos en programas computacionales para el modelado de ruido en ciudades.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. *Objetivo general.* Establecer un modelo para estimar el ruido generado por la interacción llanta-pavimento en corredores viales de pavimento rígido y flexible de Bogotá D.C.

1.3.2. *Objetivos específicos.*

- Continuar el desarrollo del estado del conocimiento a nivel mundial y nacional.
- Diagnosticar los niveles de ruido generado por la interacción llanta-pavimento en tipologías de vía desde el punto de vista del tipo de rodadura.
- Diagnosticar los niveles de ruido generado por la interacción llanta-pavimento en tipologías de vía desde el punto de vista del nivel y tipo de tráfico.
- Diagnosticar los niveles de ruido generado por la interacción llanta-pavimento en tipologías de vía desde el punto de vista del tipo de llanta de los vehículos.
- Diagnosticar los niveles de ruido generado por la interacción llanta-pavimento en tipologías de vía desde el punto de vista de la velocidad de operación.
- Definir los valores característicos de los subfenómenos para el ruido generado por la interacción llanta-pavimento.

1.4. METODOLOGIA PROPUESTA

Para cumplir con los objetivos planteados se propone el desarrollo de la siguiente metodología:

- a) Construcción y desarrollo del estado del conocimiento: En esta etapa se consultó toda la información técnica en journals, revistas y textos internacionales y se verificó a nivel de entidades públicas sobre la

existencia de documentos relacionados con el tema. Se indagó sobre la visión que tiene la autoridad competente relacionada con la problemática tratada. Se realizó toda la recopilación y revisión de información existente. Se solicitó a las autoridades competentes información existente sobre volúmenes de tránsito, velocidades de operación, estudios de ruido ambiental.

- b) Definición de tipologías para evaluación: Teniendo en cuenta que el proyecto se constituye en prueba piloto se definieron dos sectores viales que no representen riesgo para la medición.
- c) Caracterización de las superficies: En cuanto a tipo de rodadura, los niveles de tráfico y tipos de vehículos, tipología de llantas de los vehículos, y velocidad de operación de los vehículos.
- d) Definición de parámetros característicos de cada tramo evaluado: Con la información levantada en las mediciones de campo, se llevó a cabo el análisis de resultados de los mismos para estimar condiciones prevaletientes y características.
- e) Mediciones utilizando Close Proximity Method – CPX: Con el equipo prototipo desarrollado en conjunto por el grupo de investigación en ingeniería civil e ingeniería mecatrónica de la Universidad Piloto de Colombia y ajustando las características definidas en la actividad d, teniendo presente el estándar ISO para la medición, se recorrió cada uno de los sectores viales.



Figura 17. Equipo prototipo para medición de ruido de la interacción llanta-pavimento. Fuente: VAN LEEWEN, 2011

- f) Análisis de resultados: permitió definir los aspectos más influyentes en el aporte del pavimento en la generación del ruido por la interacción llanta-pavimento y valores característicos de intensidad sonora para cada sector vial.
- g) Propuesta de modelo para estimar el ruido de la interacción llanta-pavimento: Con las mediciones obtenidas se encuentran los valores característicos para cada tramo. Además de quedar establecido el modelo de trabajo para continuar con las mediciones en otros sectores de la ciudad en una próxima investigación.

1.5. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

A continuación se presenta la distribución de actividades en el tiempo, para llevar a cabo el proyecto de investigación:

Tabla 5. Cronograma de actividades para la investigación

Actividad	Bimestre					
	1	2	3	4	5	6
Construcción estado del conocimiento						
Definición de tipologías para evaluación						
Caracterización de las superficies						
Definición de parámetros característicos de cada tramo evaluado						
Mediciones utilizando equipo prototipo						
Análisis de resultados						
Propuesta de modelo para estimar el ruido de la interacción llanta-pavimento						
Elaboración de Informe y sustentación						

1.6. RESULTADOS/PRODUCTOS ESPERADOS Y POTENCIALES BENEFICIARIOS

1.6.1. Relacionados con la generación de conocimiento y/o nuevos desarrollos tecnológicos: Con el nuevo conocimiento generado a partir del proyecto, se contará con un aporte significativo en el entendimiento del fenómeno de la interacción llanta-pavimento. Se colocará a disposición de la comunidad nacional el primer modelo de comportamiento del fenómeno por la interacción llanta-pavimento, de acuerdo con lo mostrado en la siguiente tabla.

Tabla 6. Generación de nuevo conocimiento de la investigación

Resultado / Producto Esperado	Indicador	Beneficiario
Entendimiento del fenómeno de la generación del ruido por la interacción llanta pavimento	Publicación del proyecto de investigación	Comunidad académica nacional e internacional. Entidades como INVIAS, IDU, Secretaría de Medio Ambiente, Ministerio de Medio Ambiente, comunidad afectada. Empresas constructoras de vivienda con calidad de vida.

1.6.2. Conducentes al fortalecimiento de la capacidad científica

Institucional y Nacional: El desarrollo del trabajo en el tema de investigación, potencia investigación que armoniza con el tema de la sostenibilidad de las obras de infraestructura y posibilita la formación de redes temáticas de conocimiento que tratarán el tema en el mediano plazo.

De la misma manera se crea un espacio de trabajo interdisciplinario para el desarrollo de equipos de medición en el área de gestión de pavimentos, de acuerdo con lo mostrado en la siguiente tabla.

Tabla 7. Fortalecimiento de la comunidad científica por la investigación

Resultado / Producto Esperado	Indicador	Beneficiario
Interacción con grupos de investigación	Trabajo conjunto	Grupos de investigación
Generación de vínculos	Cooperación interdisciplinaria	Grupos de investigación

1.6.3. Dirigidos a la apropiación social del conocimiento: Se presentará al menos dos ponencias, una a nivel nacional y otra a nivel internacional y se remitirá artículo científico tipo revista de acuerdo con la normas de la publicación cuadernos de la maestría, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 8. Apropiación social del conocimiento de la investigación

Resultado / Producto Esperado	Indicador	Beneficiario
Artículo científico tipo revista	Publicación en el compendio cuadernos de la maestría	Grupo de investigación que aborda el proyecto, Entidades como INVIAS, IDU, Secretaría de Medio Ambiente, Ministerio de Medio Ambiente, comunidad afectada, nuevas investigaciones.
Ponencias en eventos científicos	2 ponencias (1 nacional y 1 internacional)	Comunidad académica nacional e internacional. Grupos de investigación, Entidades como INVIAS, IDU, Secretaría de Medio Ambiente, Ministerio de Medio Ambiente, comunidad afectada, nuevas investigaciones.

1.7. IMPACTOS ESPERADOS A PARTIR DEL USO DE LOS RESULTADOS

Para cada uno de los impactos esperados se identifican indicadores cualitativos o cuantitativos verificables, tal como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 9. Impactos esperados de la investigación

Impacto esperado	Plazo (años) después de finalizado el proyecto: corto (1-4), mediano (5-9), largo (10 o más)	Indicador verificable	Supuestos*
Construcción de mapas de ruido de Bogotá D.C.	2 años	Desarrollo de segunda fase del proyecto	Continuidad en el tema y atención de las autoridades
Entendimiento de la problemática a nivel nacional	1 año	Publicación de normativa, documento guía para mediciones	Continuidad en el tema y atención de las autoridades
Mitigación del problema	2 - 4 años	Mediciones de las Entidades, percepción de la sociedad	Continuidad en el tema y atención de las autoridades
Normatividad en el tema	4 años	Entrada en vigencia de la normativa	Continuidad en el tema y atención de las autoridades

* Los supuestos indican los acontecimientos, las condiciones o las decisiones, necesarios para que se logre el impacto esperado.

1.8. DECLARACIONES SOBRE EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

1.8.1. Sobre Impacto Ambiental: El impacto ambiental del presente proyecto de investigación, es evidente, en el sentido que se propone identificar factores y variables que inciden en la contaminación sonora ambiental por efecto de los vehículos. Teniendo en cuenta que como resultado se proponen formular recomendaciones dirigidas a la mitigación del ruido generado por la interacción llanta-pavimento, se concluye que el impacto ambiental del proyecto es significativo, necesario y pertinente en el contexto nacional e internacional y que propende por la mejora de la calidad de vida y uso del suelo en el área de afectación de un proyecto vial relacionado con el desarrollo o tendencias particulares de la población a ubicarse en sectores estratégicos para la consecución de transporte público en el menor tiempo posible.

1.8.2. Pertinencia social: El tema de la contaminación sonora es un problema de difícil control y detección. La organización mundial de la salud ha dado cifras sobre los efectos de la misma y de las consecuencias que este problema representa para la salud de las personas. El proyecto es pertinente a nivel social, toda vez que se pretende generar recomendaciones dirigidas a la mitigación del ruido generado por la interacción llanta-pavimento acompañado de una propuesta de modelo para evaluar el comportamiento del fenómeno. La población beneficiada del proyecto son todas aquellas residencias o domicilios que se encuentran en la actualidad expuestos a la contaminación sonora por efecto de tráfico vehicular, es decir en general toda la población que se desarrolla en inmediaciones de las superficies viales.

1.8.3. Aporte a la educación: El aporte a la educación del proyecto se puede visualizar desde diferentes ópticas. Teniendo en cuenta que el proyecto abre la posibilidad de la creación de redes temáticas de conocimiento en infraestructura sostenible, en el cual se creará conciencia en los estudiantes sobre la necesidad de proponer soluciones a los problemas de la infraestructura desde

la perspectiva de la sostenibilidad. La experiencia adquirida en el proyecto fortalecerá la Maestría en el área de ingeniería y la divulgación de resultados permitirá la visualización de la universidad como actor en desarrollo de actividades multidisciplinarias e interacción con grupos nacionales en la definición de políticas nacionales.

2. PRESUPUESTO

A continuación se describen los componentes económicos para el desarrollo de la investigación.

Tabla 10. Presupuesto global de la propuesta por fuentes de financiación (en miles de \$)

RUBROS	FUENTES			TOTAL
	U. SERGIO ARBOLEDA	U. PILOTO	RECURSOS PROPIOS	
PERSONAL	4.000	4.000	8.000	16.000
EQUIPOS		18.000	500	18.500
SOFTWARE				
MATERIALES			650	650
SALIDAS DE CAMPO			1.000	1.000
MATERIAL BIBLIOGRAFICO				
PUBLICACIONES Y PATENTES				
SERVICIOS TÉCNICOS				
VIAJES		1.000	4.300	5.300
CONSTRUCCIONES	NO FINANCIABLE			
MANTENIMIENTO	NO FINANCIABLE			
TOTAL	4.000	23.000	14.450	41.450

Tabla 11. Descripción de los gastos de personal (en miles de \$)

Nombre del Investigador Experto/Auxiliar	Formación Académica	Función dentro en el proyecto	Dedicación Horas/ Semana	RECURSOS			TOTAL
				U. SERGIO ARBOLEDA	Contrapartida		
					U. Piloto	Recursos Propios	
Jhon Wilson Correa Avello	Especialista	Investigador	20	4.000	4.000	8.000	12.000
Hernando Camacho Camacho	Magister	Asesor	4				
TOTAL				4.000	4.000	8.000	16.000

Tabla 12. Descripción de los equipos que se planea adquirir
(en miles de \$)

EQUIPO	JUSTIFICACIÓN	RECURSOS		TOTAL
		U. SERGIO ARBOLEDA	U. PILOTO	
Prototipo para medición de fenómeno en campo	Realización de medición de ruido ajustado a las condiciones evaluadas		18.000	18.000
TOTAL			18.000	18.000

Tabla 13. Descripción y cuantificación de los equipos de uso propio
(en miles de \$)

EQUIPO	VALOR
Computador	500
TOTAL	500

Tabla 14. Descripción y justificación de los viajes (en miles de \$)

Lugar/No. Viajes	Justificación	Pasajes (\$)	Estadía (\$)	Total días	Recursos		Total
					U. PILOTO	PROPIOS	
Cartagena	Presentación de Ponencia	300	1.000	5	1.000	300	1.300
La Habana	Presentación de Ponencia	1.000	3.000	5		4.000	4.000
TOTAL		1.300	4.000	10	1.000	4.300	5.300

Tabla 15. Descripción y justificación de los viajes (en miles de \$)

Ítem	Costo unitario	#	Total
Desplazamiento entre sitios de medición	20	50	1.000
TOTAL	20	50	1.000

Tabla 16. Materiales y suministros (en miles de \$)

Materiales	Justificación	Valor
Papelería	Entrega de reportes e informes	550
Comunicaciones	Gestión de permisos y trámites	100
TOTAL		650

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

Las actividades planteadas, desarrolladas con la colaboración de la Dirección de Investigaciones, programas de ingeniería civil e ingeniería mecatrónica de la Universidad Piloto de Colombia, Gilberto Martínez Arguelles, Luis Jorge Herrera Fernández, Robin Alfonso Blanco, José Mauricio Lemus Porras, Omar Hernán Alberto Delgado, Christian Caicedo Bautista, Giovanny Andrés Contreras Reina, Fernando Valles Navarrete, Wilson Giovanni Rodríguez Aguilar, Roger Frank Poblador Navas y Sara Milena Espejo Rojas, corresponden a un trabajo que usa método para investigación aplicada mediante el cual se evaluaron características prevalecientes en tipologías de sectores típicos de estructuras de pavimentos para cada uno de los siguientes aspectos:

- Superficie de rodamiento
- Niveles de tráfico
- Tipos de vehículos
- Velocidad de operación de los vehículos
- Tipología de llantas de los vehículos

A continuación, se presenta el compendio de los resultados obtenidos para cada aspecto evaluado en los sectores Calle 26 (Pavimento Rígido) y Calle 80 (Pavimento Flexible), observándose en las siguientes fotografías la apariencia de cada uno de los tramos evaluados.

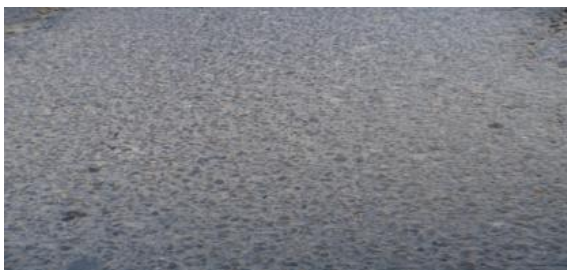


Figura 18. Apariencia de pavimento flexible seleccionado en Calle 80



Figura 19. Apariencia de pavimento rígido seleccionado en Calle 26

3.1. SUPERFICIE DE RODAMIENTO

Las técnicas de medición se apoyaron en procedimientos estandarizados que permiten obtener las características superficiales del sector y que consistieron en el ensayo circulo de arena (INV E-791), que es aplicable a cualquier tipo de pavimento en este caso rígido y flexible, y consiste en extender sobre la superficie un volumen de arena fina, distribuyéndola y enrasándola posteriormente mediante un dispositivo adecuado. A partir del volumen de arena utilizado y del área cubierta por la misma sobre el pavimento, se calcula la profundidad media de los vacios superficiales rellenos por la arena, valor que indica la textura superficial del pavimento en el tramo escogido. La siguiente figura muestra los parámetros para calificar los resultados.

SUPERFICIE		ESCALA DE TEXTURA	
		MACRO	MICRO
R - A	A	RUGOSA	ASPERA
R - P	B	RUGOSA	PULIDA
S - A	C	SUAVE	ASPERA
S - P	D	SUAVE	PULIDA

Figura 20. Parámetros para calificar resultados del ensayo circulo de arena

Y a continuación se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los sectores viales:

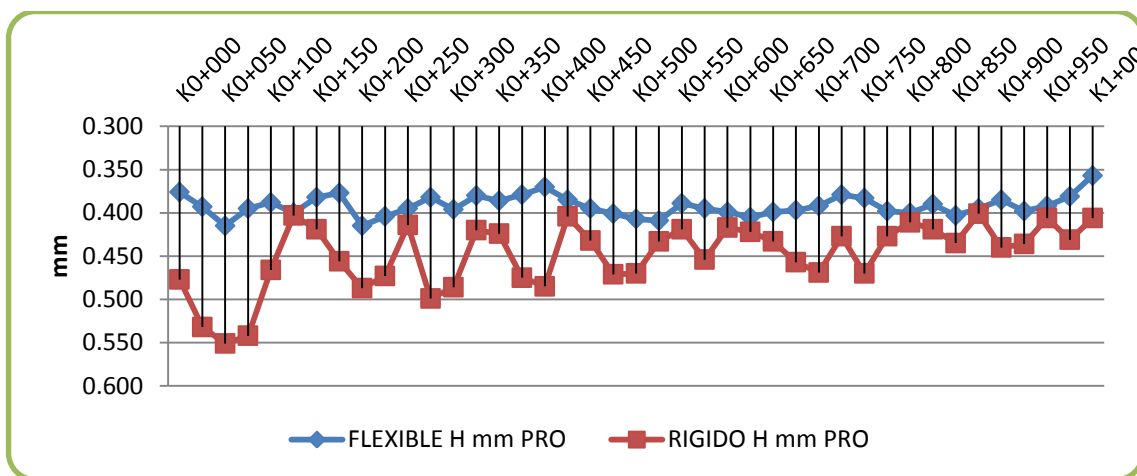


Figura 21. Comparación de dos tramos de acuerdo con los datos obtenidos en el ensayo circulo de arena

Relacionando los dos tramos seleccionados se observa que la variación es mucho más alta en el pavimento Rígido que en el Flexible, de acuerdo a la tabla de escala de la textura se concluye que el pavimento Flexible se encuentra dentro del rango suave – áspero, y el pavimento Rígido dentro de los rugosos – ásperos, esto se debe a que este tipo de pavimento en su proceso constructivo

es sometido a texturizado longitudinal y transversal, lo cual hace que contribuya a la generación de ruido entre la interacción llanta pavimento.

La segunda característica evaluada consistió en la rugosidad, medida a través del ensayo de IRI (Índice de Rugosidad Internacional INV E-790), que consiste en hacer un recorrido por los tramos seleccionados utilizando el equipo MERLIN, equipo que tiene un sistema que permite que a través del trayecto se vaya determinando las depresiones y elevaciones de la vía, y de esta manera se obtiene el perfil longitudinal de la misma. Se presenta a continuación la escala internacional de medida y los resultados obtenidos para cada tramo de vía seleccionado.

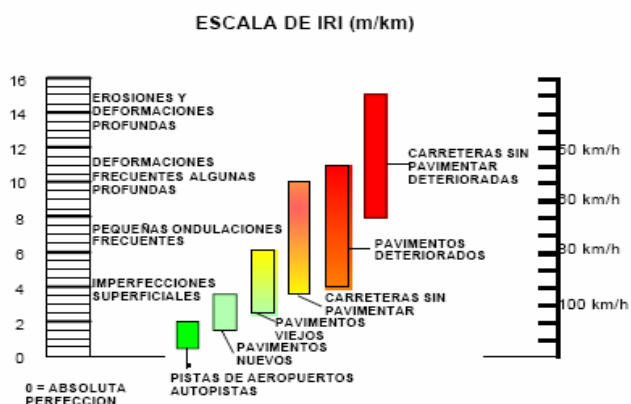


Figura 22. Parámetros para calificar resultados del ensayo IRI (Índice de Rugosidad Internacional)

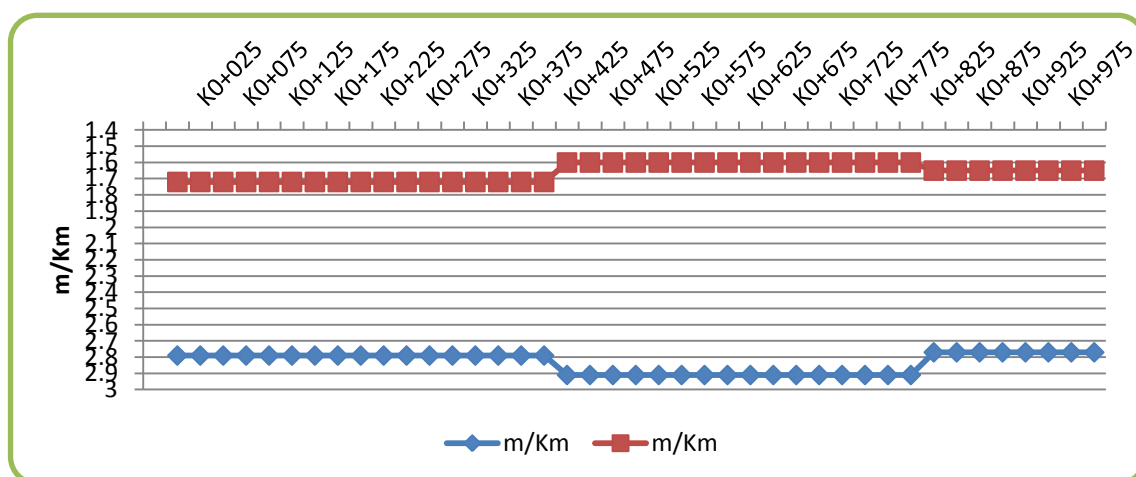


Figura 23. Comparación de dos tramos de acuerdo con los datos obtenidos en el ensayo IRI

El índice de rugosidad en el pavimento rígido es menor que en el pavimento flexible, aunque presentan variaciones similares en cuanto al perfil longitudinal de cada una de las vías, teniendo en cuenta la escala del banco mundial estas dos vías se encuentran dentro de los rangos permitidos para la circulación de vehículos.

Por último el ensayo de profundidad media de perfil, el cual consiste en la medición transversal de la vía, permitiendo la caracterización de los puntos existentes como hundimientos o elevaciones. Para la realización del ensayo se emplea una regla de 3 metros y un medidor de deformación, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 17. Características del perfil longitudinal

Dominio	Longitud de onda	Amplitud
Trazado	50-1000 m	0,5 – 50 m
Regularidad superficial	0,5 – 50 m	0,001 – 0,5 m
Textura	0 – 0,5 m	0,001 – 50 mm

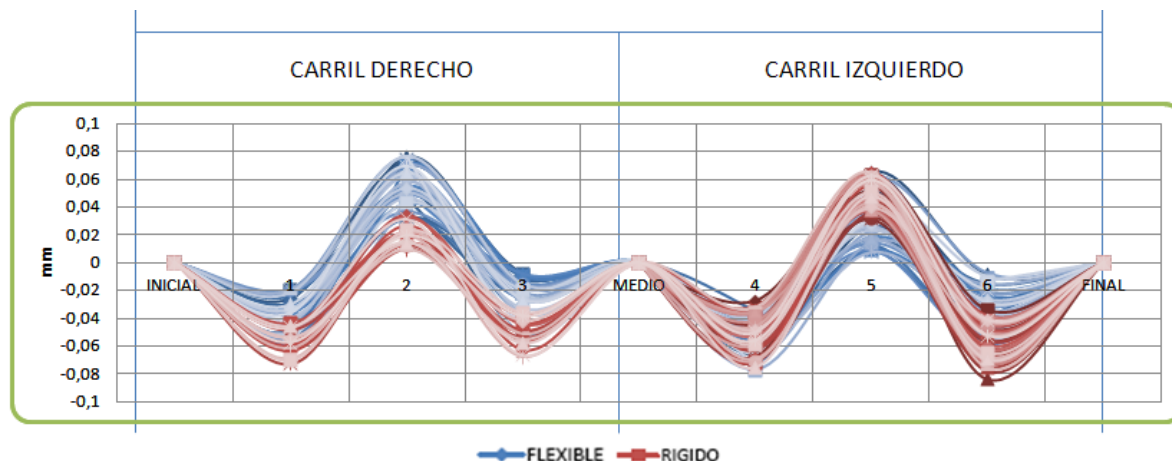


Figura 24. Comparación de los dos tramos de acuerdo con los datos obtenidos en el ensayo de profundidad media de perfil

Evidenciándose que las características propias del carril dependerán de la frecuencia de uso y características propias del material que constituye la superficie de rodamiento.

3.2. NIVELES DE TRÁFICO, TIPOS DE VEHÍCULOS Y VELOCIDAD DE OPERACIÓN DE LOS VEHÍCULOS

Los procesos llevados a cabo consistieron en la determinación de aforos en los tramos de vía seleccionados de acuerdo con las metodologías estandarizadas por la ingeniería de tránsito, obteniéndose los siguientes resultados promedio para las características de mayor uso del sistema vial:

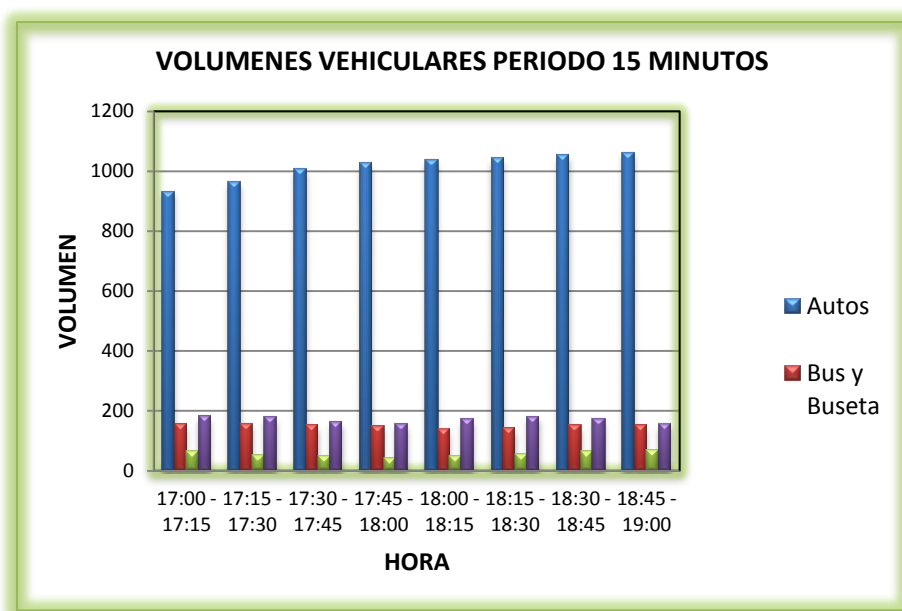


Figura 25. Resultados Calle 26 condición de flujo vehicular máximo

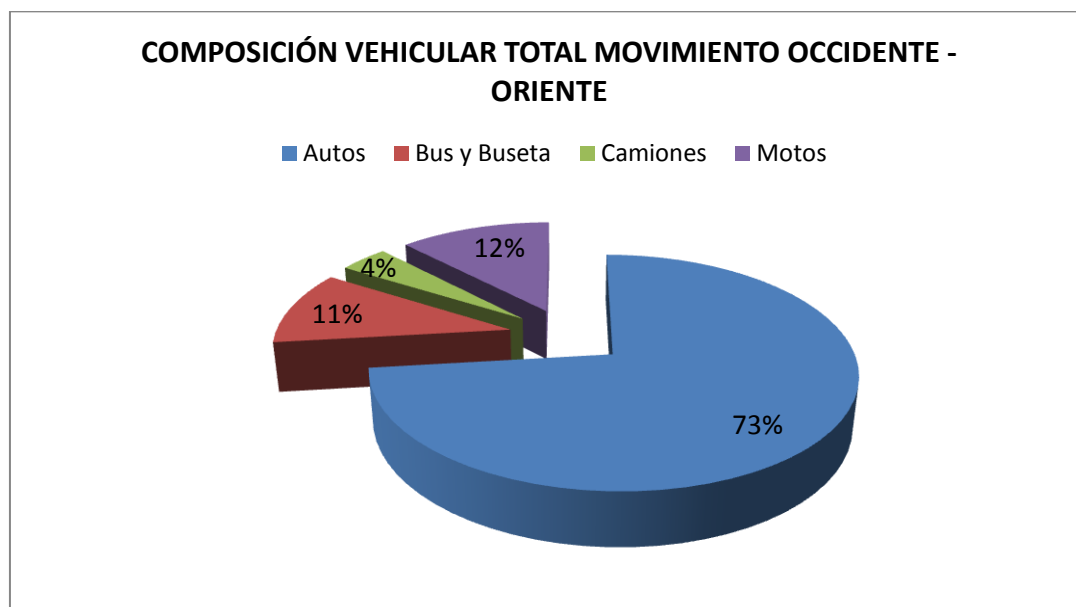


Figura 26. Resultados Calle 26 composición flujo vehicular máximo

Tabla 18. Composición total de flujo vehicular para el día de comportamiento máximo en la calle 26

HORA	1		2		3		4		5	
	VL MAX	%	VL MAX	%	VL MAX	%	VL MAX	%	VL MAX	%
05:00 - 07:00	4114	63,64	4163	63,35	4145	63,93	3660	62,09	3652	61,57
07:00 - 09:00	4408	55,25	4370	55,25	4401	55,2	4365	54,36	4342	54,02
09:00 - 11:00	3689	56	3777	56,05	3554	54,47	3315	52,1	3360	52,17
11:00 - 13:00	4732	55,53	4817	54,63	4894	52,67	4805	52,77	4393	52,63
13:00 - 15:00	3897	52	3902	52,02	3986	51,88	4013	52,33	4286	53,43
15:00 - 17:00	3723	53,89	3751	53,69	3676	52,81	3685	52,91	4063	52,41
17: 00 - 19:00	4741	52,82	4844	53,27	4790	52,87	4827	52,94	5001	51,39
19:00 - 21:00	4566	51,53	4644	51,66	4691	52,08	4659	52,35	4705	53,03
21:00 - 23:00	3260	61,7	3425	62,1	3480	61,58	3382	60,1	3388	60,27

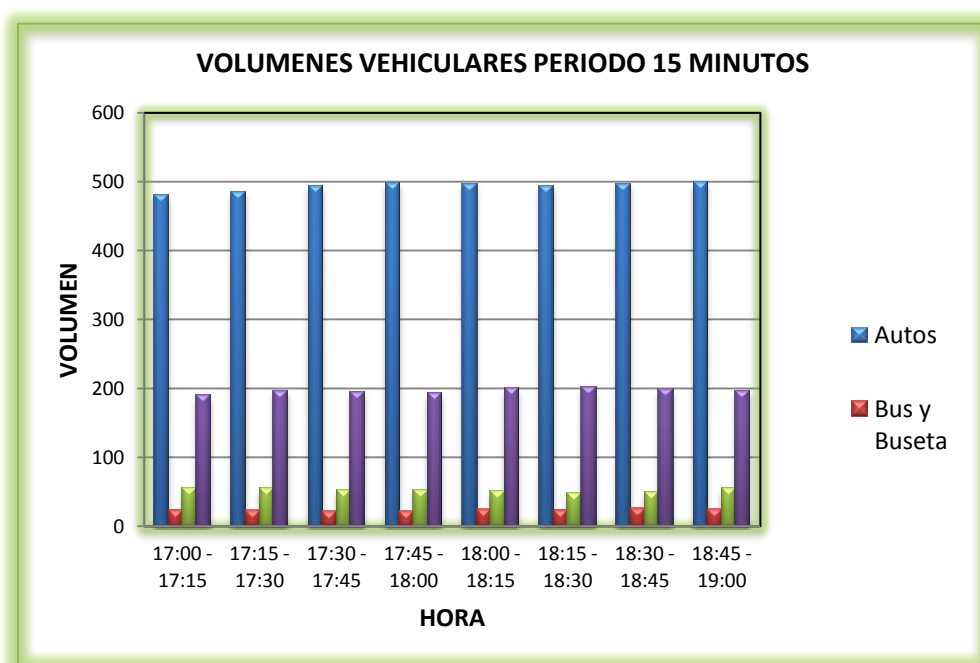


Figura 27. Resultados Calle 80 condición de flujo vehicular máximo

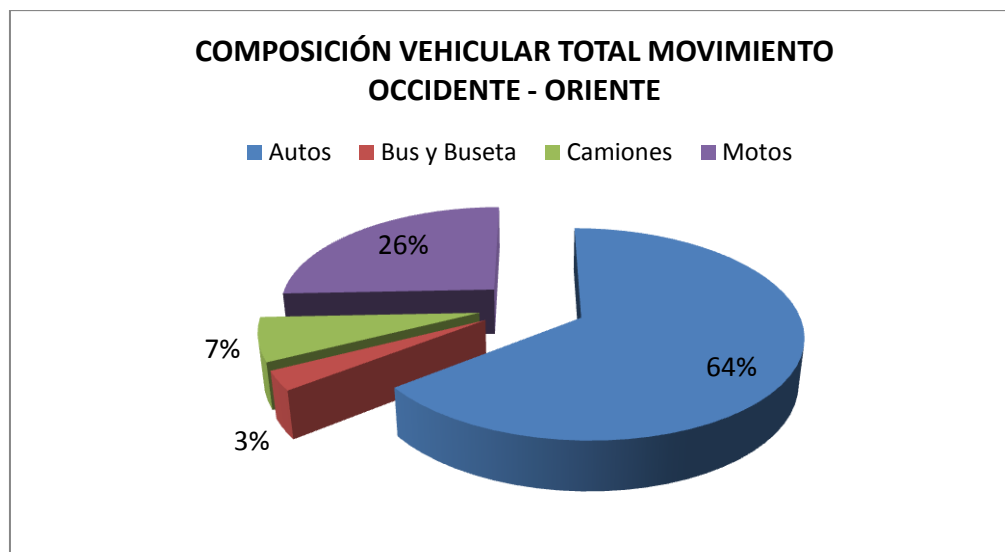


Figura 28. Resultados Calle 80 composición flujo vehicular máximo

Tabla 19. Composición total de flujo vehicular para el día de comportamiento máximo en la calle 80

HORA	1		2		3		4		5	
	VL MAX	%	VL MAX	%	VL MAX	%	VL MAX	%	VL MAX	%
05:00 - 07:00	997	52,86	999	53,08	975	53,34	974	53,75	986	53,21
07:00 - 09:00	1551	57,79	1490	57,07	1439	55,95	1478	56,52	1402	55,33
09:00 - 11:00	1407	56,67	1618	51,07	1671	53,44	1816	53,78	1600	51,4
11:00 - 13:00	1763	52,97	1841	51,5	1959	52,42	1873	51,22	1710	51,37
13:00 - 15:00	1640	51,56	1835	51,26	2146	51,17	1832	50,04	1663	50,67
15:00 - 17:00	1738	52,27	2015	51,87	2193	50,69	2031	51,47	1760	51,54
17: 00 - 19:00	2071	52,59	2191	51,22	2285	50,31	2155	51,49	1951	51,42
19:00 - 21:00	2101	52,7	2136	52,47	2143	54,75	2006	52,34	1843	53,56
21:00 - 23:00	1540	60,65	1704	55,72	1523	57,23	1529	58,67	1357	57,5

Respecto a la velocidad de operación empleando radar para velocidad se encontró el siguiente comportamiento referido a los dos tramos seleccionados evaluados:

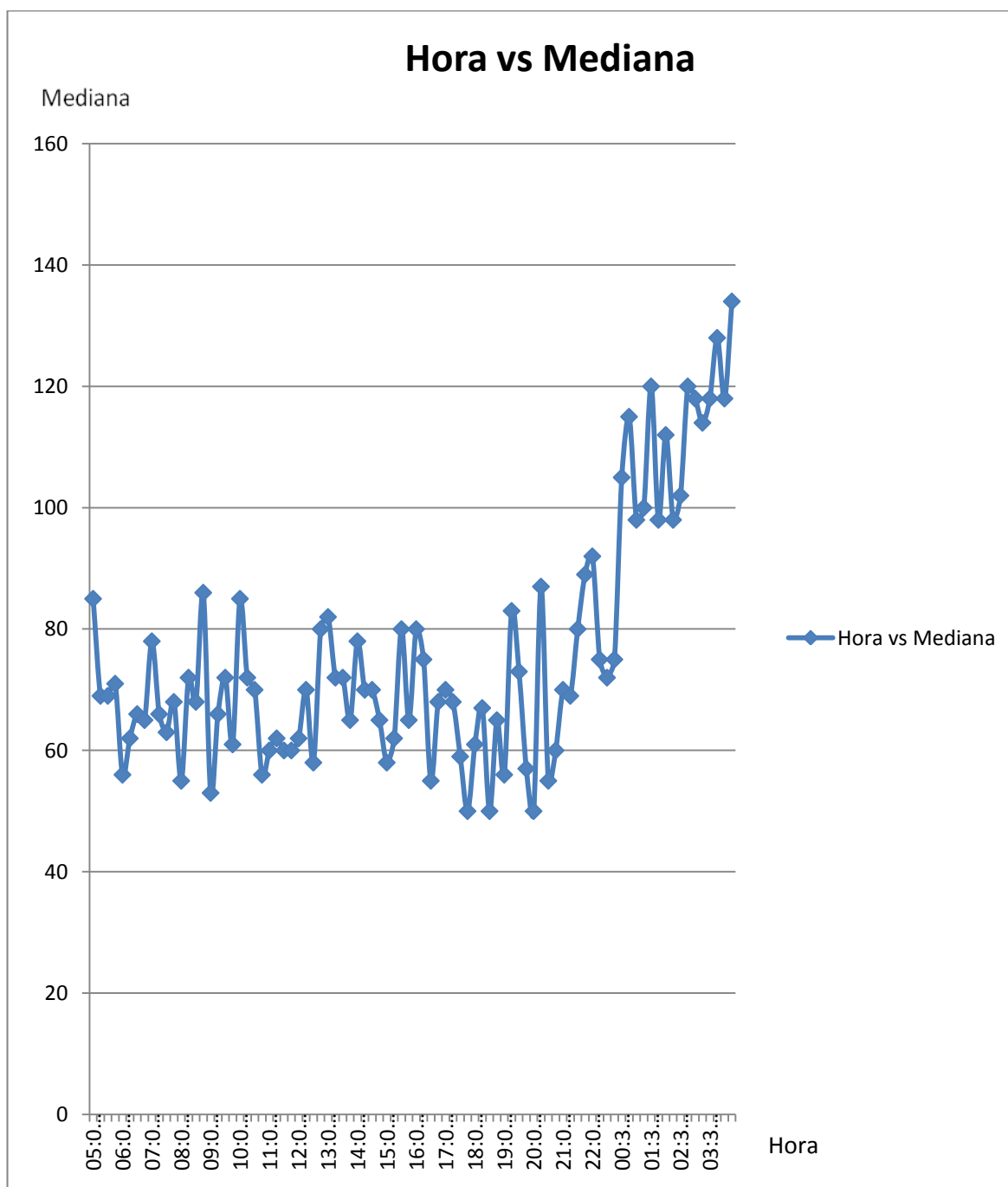


Figura 29. Resultados de medición de la velocidad para los tramos seleccionados (calle 26 y calle 80)

3.3. TIPOLOGÍA DE LLANTAS DE LOS VEHÍCULOS

A través de inspección visual, realizando detención aleatoria de vehículos se encontró que los tipos de labrado pueden agruparse en nueve tipos distribuidos de acuerdo con el siguiente comportamiento:

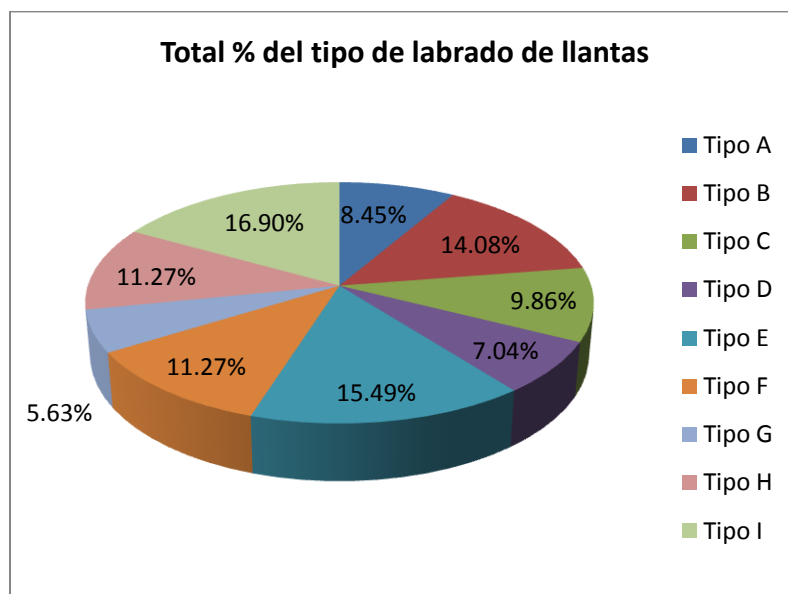


Figura 30. Resultados tipología de llantas Calle 26

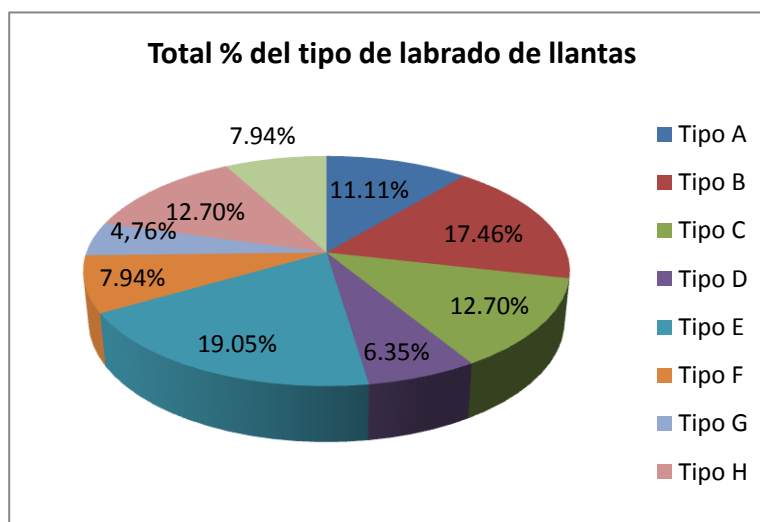


Figura 31. Resultados tipología de llantas Calle 80



Figuras 35 y 36. Equipo Construido



Figuras 37 y 38. Realización de mediciones



Figura 39. Realización de mediciones

3.5. ADQUISICIÓN DE DATOS DE CAMPO

3.5.1. Software de prueba: La recepción de la señal se hace con el programa Acoustica Premium Edition Versión libre, que muestra los niveles de ruido en 4 graficas así:

- Intensidad del ruido

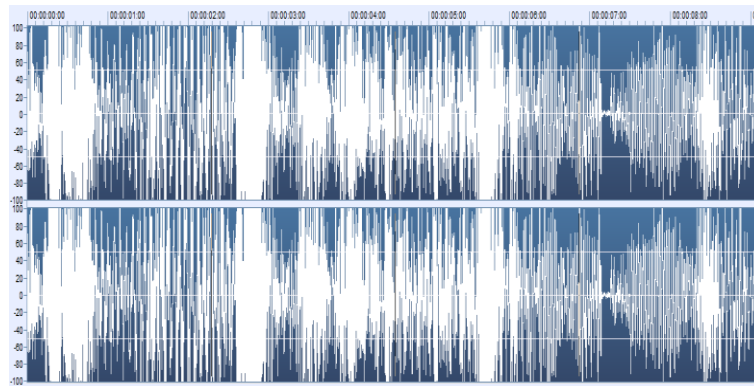


Figura 40. Tiempo(s) vs intensidad (dB)

Nivel de salida generado por la corriente, esta medición se obtiene en dos partes:

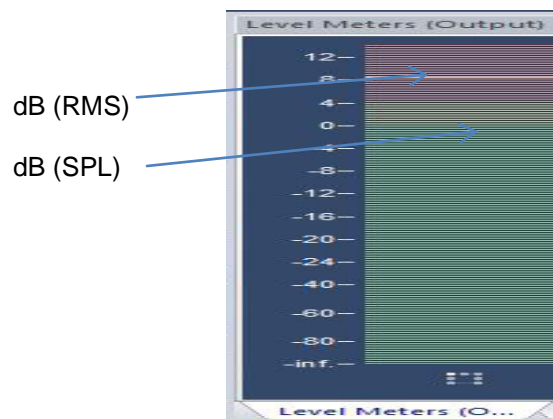


Figura 41. Nivel de salida (La intensidad de salida de la corriente se mide en dB (RMS), que son los decibeles reales del sonido y la intensidad de salida de la corriente se mide en dB (SPL), que son los decibeles medidos en presión sonora)

- Intensidad de salida (dB) vs frecuencia (Hz):

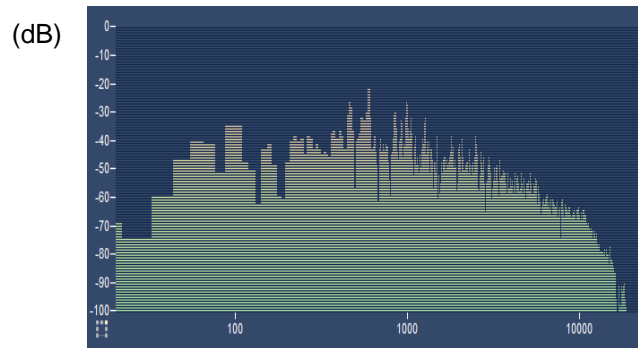


Figura 42. Escala logarítmica de frecuencia (Hz) vs intensidad (dB)

- Frecuencia (Hz) vs intensidad de salida (dB)

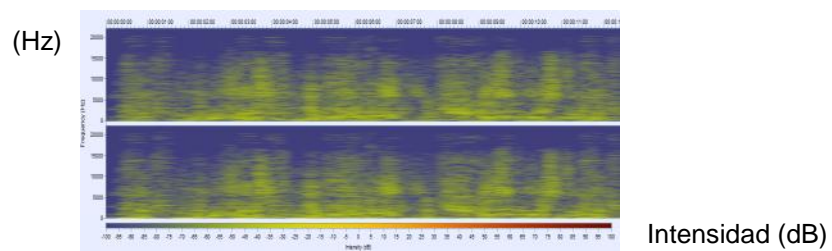


Figura 43. Espectrograma de intensidad (dB) vs frecuencia (Hz)

3.5.2. Estadística de la medición: Salida que muestra los parámetros característicos obtenidos en cada una de las mediciones realizadas.

Statistics		
Value	Front left	Front right
RMS Power	-3.71 dB	-3.71 dB
Maximum peak	12.77 dB	12.77 dB
Minimum peak	11.60 dB	11.60 dB
Position of maximum peak	00:00:00:324	00:00:00:324
Position of minimum peak	00:00:02:808	00:00:02:808
Average (DC offset)	-0.037 %	-0.037 %
Zero crossings	2097	2097
Zero crossing rate	228.77 Hz	228.77 Hz

OK

Figura 44. Estadísticas de la medición

3.5.3. Estandarización de niveles puros a niveles audibles: El oído humano no percibe igual las distintas frecuencias, de ahí que para aproximar más la unidad a la realidad auditiva, se determinan las unidades que el oído siente y para ello se utilizan las curvas isofónicas que permiten establecer una interfaz de los datos obtenidos. Es decir que por medio de la frecuencia se hallan los dB(A) que el oído percibe.

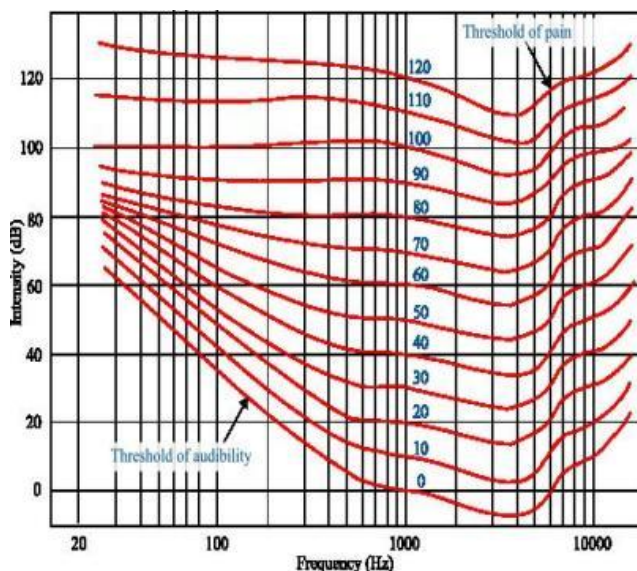


Figura 45. Curvas isofónicas

3.5.4. Mediciones en campo: Ajustando las condiciones prevalecientes referidas al uso del sector vial se encuentra el siguiente comportamiento característico de cada uno de los sectores:

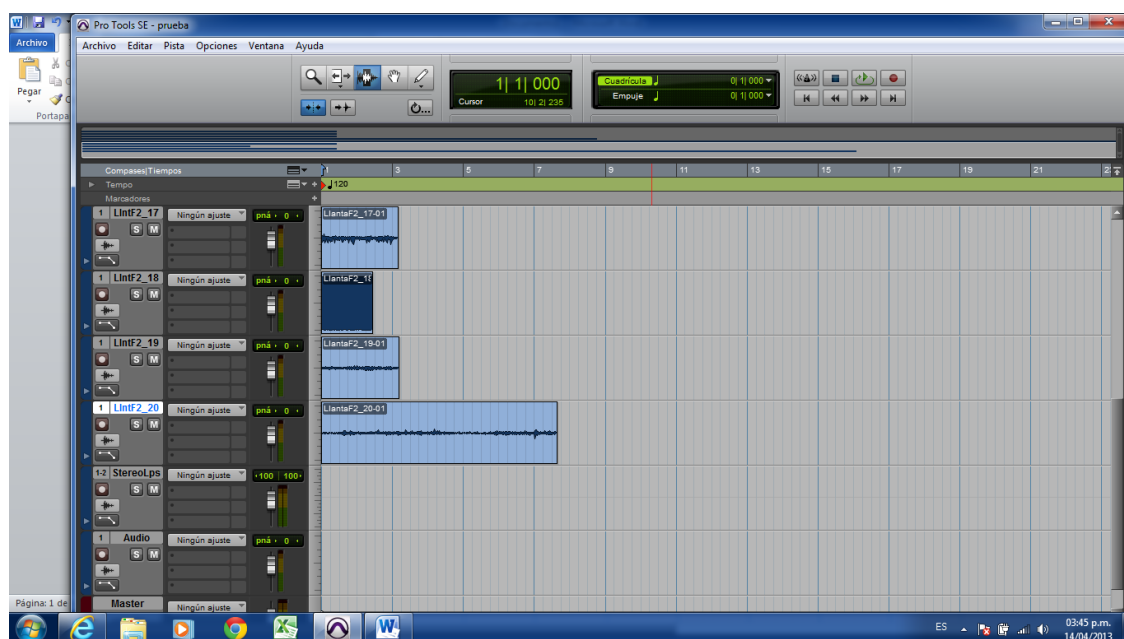


Figura 46. Resultados de medición Calle 26

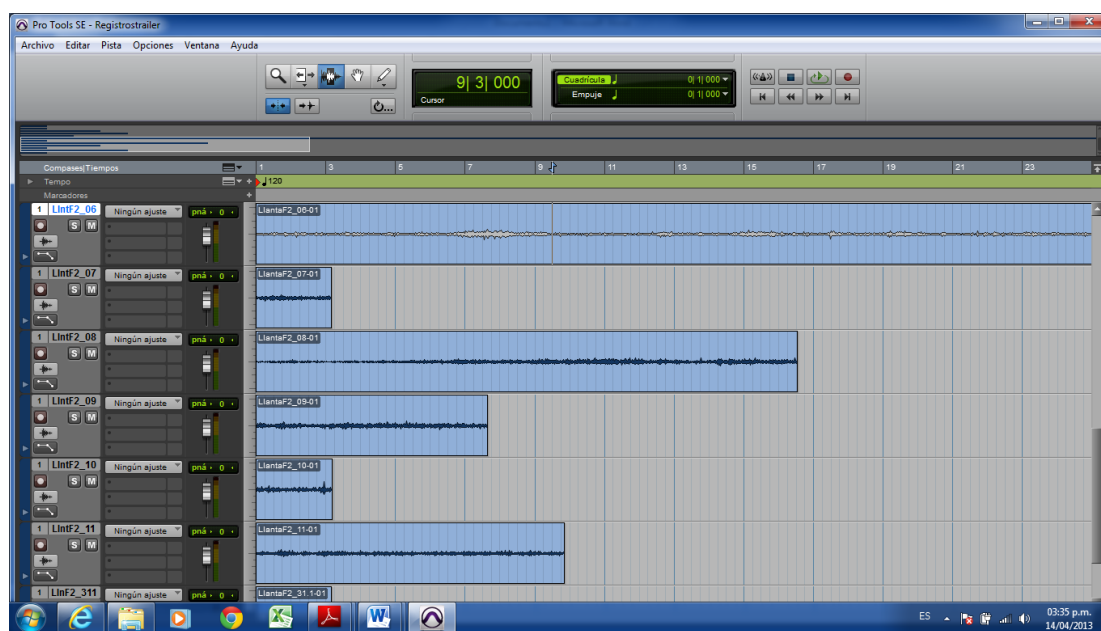


Figura 47. Resultados de medición Calle 80

Es decir que los parámetros característicos permiten encontrar como valor propio de cada sector vial, los mostrados a continuación:

Tabla 20. Análisis de acuerdo al ensayo frecuencia vs velocidad de operación
(Hz vs Km/h)

Tipo de superficie/ Velocidad de operación (Km/h)	Pavimento flexible Frecuencia(Hz)	Pavimento rígido Frecuencia(Hz)
60-80	900	1150

Tabla 21. Resumen estadístico Intensidad (dB) vs velocidad de operación
(Km/h)

Tipo de superficie/ Velocidad de operación (Km/h)	Pavimento flexible Intensidad (dB)	Pavimento rígido Intensidad (dB)
60-80	75	77

4. CONCLUSIONES

Los resultados de la investigación se constituyen en pioneros debido a que en el país no se habían realizado pruebas de este tipo.

Los resultados obtenidos permiten iniciar una serie de actividades de investigación referidos al desarrollo de infraestructura vial sostenible y calidad de vida de los habitantes en inmediaciones de los corredores viales.

Se ha complementado el estado del conocimiento a partir del cual se podrán establecer módulos pedagógicos para incluir los resultados en las asignaturas de formación para el diseño de pavimentos.

Las condiciones de uso de los corredores viales definieron que la velocidad de operación oscila entre 60 y 80 Km/hrs.

Para las condiciones de regularidad superficial se encuentra que los parámetros medidos le atribuyen al pavimento rígido mayor nivel de sonoridad.

Las condiciones de volumen de vehículos atribuyen mayor intensidad de sonido a los corredores viales debido a que la prueba se simuló solamente con un vehículo.

Existe gran variabilidad en el uso de labrados de llantas, aunque se evidencia que los referidos a categoría B y C, según norma internacional, son los que en mayor porcentaje se emplean tanto para calle 26 y calle 80.

Se construyo equipo para medición del fenómeno.

Se realizaron mediciones en cada corredor vial de acuerdo con las condiciones de uso y exposición prevalecientes, encontrando valores característicos para pavimento rígido y flexible de 1150 Hz. y 900 Hz, respectivamente.

La estandarización de la medición a niveles audibles a través de las curvas isófonas, permiten reportar como intensidad característica para pavimento flexible, 75 dB, y para pavimento rígido 77 dB.

Se estandarizó un modelo metodológico para obtener mediciones puntuales.

Cada subfenómeno analizado mostro contribución particular referido a las características propias de cada sector vial y solo hasta cuando se hayan construido los mapas de ruido se podrá analizar la incidencia de cada uno de ellos en su aporte al fenómeno.

Es posible mitigar la contaminación auditiva a través del diseño de un material en laboratorio, que reporte mejores características superficiales y tenga características de discontinuidad en la integridad de los materiales.

Se presentó ponencia nacional en el XVIII Simposio colombiano sobre ingeniería de pavimentos en la ciudad de Cartagena D.T. en Junio de 2011 denominada “Medición de propiedades acústicas de superficies carreteables”, donde se mostraron los avances referidos al estado del conocimiento y trabajo preliminar de laboratorio.

Se presentó ponencia internacional en el VII Simposio Universitario Iberoamericano sobre Medio Ambiente en la ciudad de la Habana, Cuba en Noviembre de 2012, denominada “Ruido generado por la interacción llanta-pavimento en la malla vial arterial de la ciudad de Bogotá D.C.”, donde se mostraron los avances de la investigación, referidos a la construcción del

prototipo y pruebas de campo preliminares que no usaban las características de los sectores viales.

5. RECOMENDACIONES

Continuar con la caracterización del fenómeno en distintos sectores de la ciudad a fin de establecer valores característicos.

Construir el mapa de ruido de la ciudad de Bogotá por el fenómeno de la interacción llanta-pavimento.

Analizar la incidencia de cada uno de los subfenómenos en su aporte al ruido generado por la interacción llanta-pavimento.

Construir tramos de prueba de pavimentos de características superficiales fonoabsorbentes para atenuar la intensidad del ruido de la interacción llanta-pavimento.

Estandarizar el uso de llantas en pro de la mitigación del fenómeno interacción llanta-pavimento.

Analizar la interacción de variables a fin de estimar un modelo matemático que permita predecir la intensidad del ruido de acuerdo con las características de uso y exposición.

Establecer política distrital para estrategia de mantenimiento incluyendo en los modelos de deterioro el fenómeno de la interacción llanta-pavimento.

REFERENCIAS

- [1] ACPA. (2004). Repeatability Testing of a Modified Ames LISA Profiler for use on Tines Concrete. R&T Update, Concrete Pavement Research and Technology 5.01. www.pavement.com.
- [2] ADAMS, G., et al. Dynamic Measurement of Tyre/Road Noise. Available from:<http://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/AASNZ2006/papers/p63.pdf>.
- [3] BENNERT, T.; HANSON, D. and MAHER, A. Demonstration Project - the Measurement of Pavement Noise on New Jersey Pavements using the NCAT Noise Trailer. , 2004.
- [4] BERNHARD, R. J.; and THORNTON, W. D. Preliminary Results using the Tire/Pavement Test Apparatus. Available from:<<http://210.101.116.28/W ftp41/14110709>>.
- [5] Burgé, P. L., K. Travis., Z, Rado.(2001) . A Comparison of Transverse Tined and Longitudinal Diamond Ground Pavement Texturing for Newly Constructed Concrete Pavement. Washington, D.C. Transportation Research Board.
- [6] Cackler. E. T., Ferragut. T., Harrington. Dale. (2006) Federal Highways Administration., Evaluation of U.S. and European Concrete Pavement Noise Reduction Methods.
- [7] California Department of Transportation. Sound Engineering. (2003). Innovation in Pavements. California Transportation Journal, Jan-Mar, pp. 34-37.
- [8] CESBRON, J., et al. Experimental Study of tyre/road Contact Forces in Rolling Conditions for Noise Prediction. Journal of Sound and Vibration, 2009, vol. 320, pp. 125.
- [9] CHO, D. S.; and MUN, S. Determination of the Sound Power Level Emitted by various Vehicles using a Novel Testing Method, 2008, vol. 69, pp. 185.

- [10] DESCORNET, G. Noise Classification of Urban Road Surfaces. State-of-Art. , 2006.
- [11] FHWA/AASTHO International Technology Scan(2004).Quiet Pavement Systems. Draft Executive Summary Report.
- [12] Flórez. M., Torras. S., Téllez. R. (2002). Estudio del Ruido Generado por la Operación del Transporte Carretero. Caso IV Veracruz. Publicación Técnica No. 194. Instituto de Transporte Mexicano.Qro.
- [13] FREIBURGHaus, P. ISO-Sales Enquiries. , 2011.
- [14] FREITAS, E.; and INÁCIO, O. Noise Absorption of Gap Graded Mixtures with Rubberized Asphalt. Available from:<http://www.inacoustics.com/media/site_docs/kyaysHS_t4RAvx0_Freitas_In_cio_-_Euronoise2009.pdf>.
- [15] Gavinowich, D.S., Sinnewald, D.N., Ciccarella, P.R., Gómez, P.M., Vechiatti, N.S., Iasi, F.M., Reyeros, A., Ruffa, F. Valletta, P. Actualización comparativa de estudios sobre ruido efectuados en las ciudades de Buenos Aires, La Plata y Bogotá.
- [16] HÖJER, M.; and NILSSON, N. A. A Single Wheel Trailer for tire/road Noise Measurements Enabling both the CPX- and Pass-by Methods. Available from:<<http://intellagence.eu.com/acoustics2008/acoustics2008/cd1/data/articles/002611.pdf>>.
- [17] Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá D.C., Universidad de Los Andes. (2005). Segunda fase del estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas – Pista de Prueba contrato 306-2003, Bogotá D.C.
- [18] ISO. ISO 13472-2:2010 - Acoustics- Measurement of Sound Absorption Properties of Road Surfaces in Situ - Part 2: Spot Method for Reflective Surface. , 2010Available from:<http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=32304>.
- [19] ISO. ISO 362-2:2009 - Measurement of Noise Emitted by Accelerating Road Vehicles - Engineering Method - Part 2: L Category. , 2009Available

from:<http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=42211>.

- [20] ISO. ISO 362-1:2007/Cor 1:2009 - Measurement of Noise Emitted by Accelerating Road Vehicles- Engineering Method - Part 1: M and N Categories. , 2007aAvailable from:<http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=42210>.

- [21] ISO. ISO 5130:2007 - Measurements of Sound Pressure Level Emitted by Stationary Road Vehicles. , 2007bAvailable from:<http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=38663>.

- [22] ISO. ISO 13472-1:2002 - Acoustics - Measurement of Sound Absorption Properties of Road Surfaces in Situ - Part 1: Extended Surface Method. , 2002Available from:<<http://webstore.ansi.org/RecordDetail.aspx?sku=ISO+13472-1%3A2002>>.

- [23] ISO. ISO 10534-2:1998 - Acoustics - Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes - Part 2: Transfer-Function Method. , 1998Available from:<<http://webstore.ansi.org/RecordDetail.aspx?sku=ISO+10534-2%3a1998>>.

- [24] ISO. ISO 11819-1:1997 - Methods for Measuring the Influence of Road Surface on Traffic Noise - Part 1: The Statistical Pass-by-Method. , 1997aAvailable from:<<http://webstore.ansi.org/RecordDetail.aspx?sku=ISO+11819-1%3a1997>>.

- [25] ISO. ISO 13473-1:1997 - Characterization of Pavement Texture by use of Surface Profiles - Part 1: Determination of Mean Profile Depth. , 1997bAvailable from:<<http://webstore.ansi.org/RecordDetail.aspx?sku=ISO+13473-1%3a1997>>.

- [26] ISO. ISO 10534-1:1996 - Acoustics - Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes - Part 1: Method using Standing Wave Ratio. , 1996Available from:<<http://webstore.ansi.org/RecordDetail.aspx?sku=ISO+10534-1%3a1996>>.
- [27] ISO. ISO 10844:1994 - Acoustics - Specification of Test Track for the Purpose of Measuring Noise Emitted by Road Vehicles. , 1994aAvailable from:<http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=21249>.
- [28] ISO. ISO 7188:1994 . Acoustics - Measurmenet of Noise Emitted by Passenger Cars Under Conditions Representative of Urban Driving. , 1994bAvailable from:<http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=21249>.
- [29] KIM, H. K.; and LEE, H. K. Acoustic Absorption Modeling of Porous Concrete Considering the Gradation and Shape of Aggregates and Void Ratio. Journal of Sound and Vibration, 2010, vol. 329, pp. 866.
- [30] KINSLER, L., et al. Fundamentals of Acoustics. 4a. ed. ed. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [31] López, R.L., Mora, O., Núñez, C.J. Análisis del aporte al ruido ambiental emitido por los vehículos particulares en Bogotá. VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008, Buenos Aires, Argentina.
- [32] National Cooperative Highway Research Program, NCHRP Synthesis 268.
- [33] MCNERMEY, M., et al. Comparative Field Measurements of Tire/Pavement Noise of Selected Texas Pavements. , 2000.
- [34] Pacheco, J., Franco, J., Behrentz, E. Caracterización de los niveles de ruido en Bogotá: Estudio Piloto. Revista de ingeniería de la Universidad de los Andes No. 30. Noviembre de 2009.
- [35] PUGN, S.; CLAUGHTON, D.and KAMST, F. CPX tyre/road Noise Measurements in Queensland - Noise Characteristics of various Road Surfaces. Geelong, Victoria ed. , 24 a 26 de Noviembre de 2008, 2008.
- [36] RASMUSSEN, R. O., et al. The Little Book of Quieter Pavements. , 2007.

- [37] REN, R.; and CUILAN, G. Improved Porous Noise-Reducing Asphalt Mixture Design Method. *Int. J. Pavement Res. Technol.*, 2009, vol. 2, no. 6, pp. 275.
- [38] Resolución 0627 de 2006 Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. República de Colombia.
- [39] Revista Motor (2007), El Tiempo. Septiembre 15. www.motor.com.co/
- [40] SACHAKAML, P.; and DAI, L. Road and Tyre Emission Assesment with Closed Proximity Method on an Asphalt Rubber Concrete Pavement. . TRANSPORTATION ASSOCIATION OF CANADA, ed., 2007.
- [41] Smith. R. J., Asphalt Rubber Open Graded Friction Course. ", Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference, Vilamoura, November.
- [42] Sousa. B. J., Way, B. G., Shatnawi. S., Dantas. Catia. (2006) Asphalt Rubber in New Pavement Construction and Design. Proceedings Asphalt Rubber 2006Conference., Palm Springs CA. pp67-98.
- [43] TIWARI, V.; SHUKLA, A.and BOSE, A. Acoustic Properties of Cenosphere Reinforced Cement and Asphalt Concrete. *Applied Acoustics*, 2004, vol. 65, pp. 263.
- [44] VAN LEEWEN, H.; KOK, A.and REUBSAET, J. The Uncertainty of Acoustical Measurements on Road Surfaces using the CPX-Method. Available from:<http://www.dgmr.nl/fileadmin/DGMR/Publicaties/verkeer/en/593563_The_uncertain_of_acoustical_measurements_on_road_surfaces_using_the_CPX-Method.pdf>.
- [45] Washington State Department of Transportation Quieter Pavements. (2006). Options and Challenges for Washington State.
- [46] Zareh. A., Way, B. G., Kaloush, E, K. (2006). Asphalt-Rubber Open Graded Mix Reduces Tire Pavement Noise. Proceedings Asphalt Rubber 2006Conference, Palm Springs CA. pp. 385-398.